

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Kovačić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
doc. dr. sc. Željko Alar

Student:
Nikola Kovačić

Zagreb, 2013.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Kovačić**

Mat. br.: 0035168846

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj mjerne sposobnosti tvrdomjera na rezultate mjerenja tvrdoće
Vickers metodom**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**The influence of the measurement capability of the hardness testing
machine on the results of Vickers measurement**

Opis zadatka:

Mjerenja tvrdoće ne mogu se provesti apsolutno točno jer su kao i sva druga mjerenja podložna pogreškama, čime se mjerni rezultat razlikuje od istinite vrijednosti mjerene veličine. Razni parametri utječu na nesigurnost mjerenja tvrdoće u većem ili manjem opsegu a jedan od njih je i sam tvrdomjer.

U radu je potrebno načiniti slijedeće:

1. Opisati značenje mjerne veličine tvrdoća te opisati metodu Vickers.
2. Opisati postupak provjere svih komponenti tvrdomjera.
3. Odrediti sve utjecajne veličine koje su izvori mjerne nesigurnosti tvrdomjera kroz provođenje opetovanih mjerenja u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti, te procijeniti njihov utjecaj.
4. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Željko Alar


Rok predaje rada:

1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje i uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem doc. dr. sc. Željku Alaru na stručnoj pomoći u izradi ovog rada i kolegama na Katedri za materijale i tribologiju.

Na kraju se zahvaljujem svim profesorima i kolegama, koje sam upoznao tijekom studiranja, na stručnoj pomoći, te svojoj obitelji na potpori i razumijevanju.

Nikola Kovačić

U Zagrebu, 19. rujna 2013.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA.....	VII
SAŽETAK.....	IX
1. UVOD	1
2. TVRDOĆA	2
2.1. Općenito	2
2.2. Mjerenja tvrdoće	3
2.3. Tvrdoća po Vickersu	5
2.3.1 Općenito	5
2.3.2. Područje rada	6
2.3.3. Postupak ispitivanja tvrdoće	7
2.3.4. Ispitni uzorak	8
2.3.5. Prednosti i nedostaci	8
3. TEORIJSKE OSNOVE ZA PROCJENU MJERNE NESIGURNOSTI	9
3.1. Procjena standardne nesigurnosti.....	9
3.1.1. Procjena standardne nesigurnosti vrste A	10
3.1.2. Procjena standardne nesigurnosti vrste B.....	10
3.2 Određivanje proširene i sastavljene mjerne nesigurnosti.....	11
3.3. Postupak određivanja mjerne nesigurnosti	12
3.4. Parametri koji utječu na nesigurnost mjerenja tvrdoće.....	12
4. UMJERAVANJE TVRDOMJERA	14
4.1. Značenje umjeravanja	14
4.1.2. Mjerna sljedivost	14
4.2. Postupak umjeravanja tvrdomjera.....	16
4.3. Direktna metoda umjeravanja tvrdomjera	16
4.3.1. Provjere sila opterećivanja	16
4.3.2 Provjere sustava za očitavanje veličine otiska	17
4.3.3 Provjere dijamantnog indentora	17
4.3.4. Provjera ispitnog ciklusa	18
4.4. Indirektna metoda umjeravanja tvrdomjera.....	19

4.5. Procjena mjerne nesigurnosti umjeravanja tvrdomjera	23
4.5.1 Procjena mjerne nesigurnosti kod direktne metode	23
4.5.1.1. Nesigurnost ispitne sile	23
4.5.1.2. Provjera sustava za očitavanje veličine otiska	24
4.5.2. Procjena mjerne nesigurnosti kod indirektnog metode	24
5. EKSPERIMENTALNI DIO	25
5.1. Plan istraživanja.....	25
5.2 Tvrdomjeri	25
5.3 Provjera i umjeravanje tvrdomjera	27
5.3.1 Provjera sila	27
5.3.2. Provjera sustava za očitavanje veličine otiska	29
5.3.3. Provjera ispitnog ciklusa.....	30
5.3.4. Indirektna metoda umjeravanja.....	31
5.4 Provođenje mjerenja tvrdoće.....	34
6. ANALIZA REZULTATA	37
6.1. Analiza rezultata provjere sila opterećenja.....	37
6.2 Analiza provjere sustava za očitavanje veličine otiska	38
6.3. Analiza rezultata umjeravanja indirektnom metodom	38
6.4 Analiza mjerenja tvrdoće.....	43
7. ZAKLJUČAK.....	45
8. LITERATURA.....	46

POPIS SLIKA

Slika 2.1 : Izgled indentora kod Vickersove metode

Slika 4.1: Mjerna sljedivost za mjernu veličinu tvrdoća

Slika 4.2: Kut između nasuprotnih strana površine dijamantne piramide indentora

Slika 4.3: Završetak piramide indentora

Slika 5.1: Tvrdomjer ZWICK tip 3212001

Slika 5.2: Tvrdomjer INDENTEC tip 5030 TKV

Slika 5.3: Dinamometar za ispitivanje sile opterećivanja

Slika 5.4: Način provjere sustava za očitavanje vrijednosti

Slika 5.5: Postavljanje etalonske pločice

Slika 6.1: Dijagramski prikaz rezultata provjere sile opterećenja

Slika 6.2: Dijagramski prikaz pogreške očitavanja na određenim duljinama

Slika 6.3: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 206,7 HV1 na tvrdomjeru INDENTEC

Slika 6.4: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 461,9 HV1 na tvrdomjeru INDENTEC

Slika 6.5: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 757 HV1 na tvrdomjeru INDENTEC

Slika 6.6: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 206,7 HV1 na tvrdomjeru ZWICK

Slika 6.7: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 461,9 HV1 na tvrdomjeru ZWICK

Slika 6.8: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 757 HV1 na tvrdomjeru ZWICK

Slika 6.9: Dijagramski prikaz izmjerenih srednjih tvrdoća s proširenom mjernom nesigurnošću na tvrdomjerima INDENTEC i ZWICK

Slika 6.10 : Dijagramski prikaz srednjih izmjerenih vrijednosti tvrdoće za oba uzorka s maksimalnim odstupanjem

Slika 6.11: Dijagramski prikaz srednjih vrijednosti mjerene tvrdoće s proširenom mjernom nesigurnošću

POPIS TABLICA

Tablica 2.1: Povijesni razvoj metoda mjerenja tvrdoće

Tablica 2.2: Raspon ispitne sile kod Vickersove metode

Tablica 2.3: Preporučene ispitne sile za određenu tvrdoću

Tablica 3.1: Izvori nesigurnosti mjerenja tvrdoće

Tablica 4.1: Dozvoljeno odstupanje sila opterećivanja

Tablica 4.2: Podjela rezolucije mjernog uređaja i maksimalno dozvoljene pogreške prema duljini dijagonale kod direktne metode

Tablica 4.3: Maksimalno dozvoljena duljina brida

Tablica 4.4: Podjela rezolucije mjernog sustava i maksimalno dozvoljene pogreške prema duljini dijagonale kod indirektna metode

Tablica 4.5: Granice ponovljivosti tvrdomjera

Tablica 4.6: Maksimalno dozvoljena pogreška točnosti tvrdomjera

Tablica 5.1: Rezultati umjeravanja sile na tvrdomjeru INDENTEC

Tablica 5.2: Rezultati umjeravanja sile na tvrdomjeru ZWICK

Tablica 5.3: Rezultati provjere veličine otiska na tvrdomjeru INDENTEC

Tablica 5.4: Rezultati provjere veličine otiska na tvrdomjeru ZWICK

Tablica 5.5: Rezultati provjere ispitnog ciklusa na tvrdomjeru INDENTEC

Tablica 5.6: Rezultati provjere ispitnog ciklusa na tvrdomjeru ZWICK

Tablica 5.7: Rezultati mjerenja na tvrdmjeru INDENTEC

Tablica 5.8: Rezultati mjerenja na tvrdmjeru ZWICK

Tablica 5.9 : Rezultati mjerenja tvrdoće trdomjerom INDENTEC

Tablica 5.10 : Rezultati mjerenja tvrdoće trdomjerom ZWICK

Tablica 6.1 : Rezultati odstupanja uređaja od referentne vrijednosti i maksimalno odstupanje uređaja s uključenom mjernom nesigurnošću

POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
a	mm	maksimalna dozvoljena duljina brida
\bar{b}	HV	odstupanje uređaja od referentne vrijednosti
d	mm	duljina dijagonale
\bar{d}	mm	aritmetička sredina duljine dijagonale otiska
E		pogreška točnosti
E_{rel}	%	relativna pogreška točnosti
F	N	sila
\bar{H}	HV	srednja vrijednost izmjerene tvrdoće
H_c	HV	vrijednost tvrdoće etalonske pločice
k		faktor pokrivanja
l	mm	duljina
r		ponovljivost
r_{rel}	%	relativna ponovljivost
S	mm ²	ploština
s_x	HV	standardno odstupanje
U	%	proširena nesigurnost procjene y izlazne veličine Y
$u(x_i)$		standardna nesigurnost
$u_{\bar{x}}$	HV	standardna mjerna nesigurnost
u_c	%	sastavljena standardna mjerna nesigurnost
$u_c(y)$		sastavljena standardna nesigurnost procjene y
u_{CRM}	HV	sastavljena mjerna nesigurnost umjeravanja

		etalonskih pločica
u_F	%	sastavljena mjerna nesigurnost umjeravanja sila opterećivanja
u_{FHTM}	%	relativna mjerna nesigurnost izmjerenih sila opterećivanja
u_{FRS}	%	relativna mjerna nesigurnost prijenosnog etalona sile
U_{HTM}	HV	proširena mjerna nesigurnost etalonskog tvrdomjera
u_L	%	sastavljena relativna mjerna nesigurnost optičkog mjernog sustava
u_{LHTM}	%	relativna standardna mjerna nesigurnost etalonskog tvrdomjera
u_{LRS}	%	relativna mjerna nesigurnost objektmikrometara
u_{ms}	%	relativna mjerna nesigurnost uslijed rezolucije optičkog mjernog sustava
\bar{x}		aritmetička sredina mjerene ulazne veličine
X_i		i-ta mjerena ulazna veličina
x_i		procjena i-te mjerne ulazne veličine
Y		mjerna izlazna veličina
y		procjena mjerene izlazne veličine Y
ΔH_{HTMmax}	HV	maksimalno dozvoljeno odstupanje etalonskog tvrdomjera
n		broj mjerenja

SAŽETAK

U ovom završnom radu opisan je utjecaj mjerne sposobnosti tvrdomjera na rezultate mjerenja tvrdoće Vickers metodom. U prvom dijelu objašnjeni su pojmovi mjerne nesigurnosti, tvrdoće i metoda mjerenja tvrdoće po Vickersu. U području mjerne nesigurnosti je dano njeno značenje te osnovni statistički temelji za njenu procjenu i proračun. Tvrdoća kao jedna fizikalna veličina čija je jedinica proizašla iz mjerenja drugih fizikalnih veličina (sila i duljina) je obrađena kroz njezin povijesni razvoj i njezino fizikalno značenje.

U drugom dijelu provedena su istraživanja i analiza utjecaja pojedinih veličina na mjernu nesigurnost dva tipa tvrdomjera po metodi Vickers. Ova istraživanja su provedena kroz postupak umjeravanja tvrdomjera te su kroz rezultate kvantificirani utjecaji na mjernu nesigurnost i sposobnost tvrdomjera. Na temelju tih rezultata mjerenja doneseni su zaključci o utjecaju mjerne sposobnosti tvrdomjera na rezultate mjerenja tvrdoće Vickersovom metodom.

1. UVOD

Tvrdoća je svojstvo materijala koje se protivi prodiranju stranog tijela u njegovu strukturu ili površinu. Unatoč tome što tvrdoća ne predstavlja fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava. Razlog tome je što je tvrdoća u korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima, a s druge strane mjerenje tvrdoće je jednostavnije i prije svega brže od ispitivanja nekih drugih mehaničkih svojstava. Nadalje, za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je mjerenje moguće, ovisno o metodi, na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima. Zbog toga su se s vremenom razvile različite metode mjerenja tvrdoće. Umjeravanje je uspostavljanje veze između pokazivanja mjerila i pokazivanja etalona. Da bi umjeravanje bilo ispravno i imalo smisla mora biti osigurana sljedivost rezultata, te izražena mjerna nesigurnost. Ispravnost sljedivosti i mjerne nesigurnosti laboratorija potvrđuje se postupkom akreditacije. Sljedivost rezultata prema nacionalnim i međunarodnim etalonima znači da je rezultat dobiven korištenjem opreme koja je umjerena u nekom "točnijem" laboratoriju, koji je pak umjeren u još "točnijem" laboratoriju, itd sve do primarnog etalona za pojedinu fizikalnu veličinu. Na taj način postiže se globalna povezanost svih rezultata unutar HRN EN ISO 17025 sustava, kako bi se mogli uspoređivati i kako bi rezultat laboratorija bio jednako mjerodavan u svim državama. Rezultat laboratorija bez osigurane sljedivosti (što je preduvjet akreditacije) izvan je bilo kakve kontrole i zapravo ne znači ništa. Jedan od primarnih problema u mjeriteljstvu danas je kako procijeniti mjernu nesigurnost rezultata mjerenja. Sve veći broj normi direktno ili indirektno kroz zahtjeve za umjeravanje i ispitivanje mjerne opreme zahtijeva procjenu mjerne nesigurnosti. Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja, koji opisuje rasipanje vrijednosti koje se mogu opravdano pripisati mjerenoj veličini. Sva mjerenja imaju određenu mjernu nesigurnost i vrijednost mjerene veličine je kompletna samo ako sadrži iskaz o mjernoj nesigurnosti.

2. TVRDOĆA

2.1. Općenito

Prema jednoj općoj definiciji, tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog znatnije tvrdog tijela. Prvu metodu za mjerenje tvrdoće razvio je još početkom prošlog stoljeća Mohs. Prema Mohsovoj skali tvrdoće materijali su svrstani u 10 razreda, ali ona sada vrijedi samo za minerale. Podjela je načinjena tako da se materijal (mineral) u nekom razredu daje zastrugati s materijalom iz višeg razreda tvrdoće. Mohsova metoda, odnosno skala, ne primjenjuje se za tvrdoće tehničkih materijala. Na tom području razvijen je čitav niz metoda ispitivanja tvrdoće. Ispitivanje tvrdoće je vjerojatno najčešće upotrebljeno ispitivanje nekog mehaničkog svojstva, unatoč tome što mehanička svojstva utvrđena ispitivanjem tvrdoće nisu fizikalno jednoznačno definirane veličine. No tvrdoća je u korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima. To se ponajprije odnosi na vlačnu čvrstoću (posebice kod općih konstrukcijskih čelika i sivog lijeva), na otpornost na abrazijsko trošenje, itd. Ispitivanje tvrdoće tek neznatno oštećuje površinu ispitivanog predmeta pa se općenito može svrstati među nerazorna ispitivanja. Za samo ispitivanje ne treba izraditi posebnu epruvetu, nego samo odgovarajuće pripremiti plohe uzorka ili strojnog dijela. Uređaji za mjerenje tvrdoće, tvrdomjeri, u pravilu su jednostavniji i jeftiniji od nekih drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava, npr. kidalica. Osnovni princip mjerenja kod većine metoda i mjerenja veličine ili dubine otiska što ga penetrator (indentor ili utiskivač), opterećen nekom silom, načini u ispitivanom materijalu. Te su metode pogodne za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala kod kojih je moguća neka plastična deformacija. Penetratori ili indentori oblika su kuglice, stošca ili piramide, a izrađeni su od tvrdih materijala (kaljeni čelik, tvrdi metali ili dijamant). Kod materijala koji imaju vrlo malu ili nikakvu mogućnost plastične deformacije (polimeri, guma) razvili su se postupci mjerenja tvrdoće, pri čemu se deformacija materijala mjeri u trenutku djelovanja sile. Kod nas najčešće primjenjivanih metoda za mjerenja tvrdoća (Brinell, Vickers, Rockwell), djelovanje sile je statičko. Kod nekih drugih rjeđe primjenjivanih postupka mjerenja tvrdoće djelovanje sile je dinamičko (Baumann, Poldi, Shore) [1].

Mjerni rezultat bilo koje veličine je potpun samo ako on sadrži vrijednost pridruženu mjerenoj veličini i mjernu nesigurnost pridruženu toj vrijednosti. Mjerna nesigurnost tvrdomjera ovisi o čitavom nizu utjecajnih veličina kao što su: mjerna metoda, mogućnost ostvarenja sile, geometrija, hrapavost i odstupanje od oblika indentora, okolišni uvjeti, mjeritelj, itd. Utjecaj nekih ovih veličina je moguće procijeniti i kvantificirati kroz provođenje opetovanih mjerenja u uvjetima ponovljivosti, dok kod drugih je potrebno dati znanstvenu prosudbu koja bi se temeljila na svim mogućim raspoloživim podacima. Nesigurnost mjernog rezultata, dobivenog na etalonskom uređaju za tvrdoću, odražava pomanjkanje potpuna znanja o vrijednosti mjerene veličine.

2.2. Mjerenja tvrdoće

Mjerenje tvrdoće je relativno stari postupak i prva mjerenja tvrdoće datiraju još iz 17. stoljeća. Tijekom vremena stalno su se razvijale nove metode ili poboljšavale (modificirale) stare metode. U tablici 2.1 dan je pregled povijesnog razvoja mjerenja tvrdoće.

Tablica 2.1: Povijesni razvoj metoda mjerenja tvrdoće [2]

Godina	Opis
1640	Barba: ocjenjivanje tvrdoće čelika pomoću turpije
1722	Reaumur: određivanje tvrdoće čelika kroz pravljenje ureza pomoću različitih minerala
1801	Hauy: Sistem tvrdoće pomoću riseva sa skalom od četiri stupnja
1820	Mohs postavlja risnu skalu tvrdoće s 10 stupnjeva
1874	Uchatius: ocjenjuje tvrdoću bronce s 25 centimetara visokim padajućim dlijetom (dinamička metoda mjerenja tvrdoće)
1900	Brinell: otkriva metodu gdje je indenter kuglica, po njemu je ova metoda i dobila ime
ca. 1905	Martens: otkriva princip penetracije indentora u ispitni uzorak s istovremenim mjerenjem sile i dubine prodiranja indentora
1907	Shore: odskočni postupak za čelike
1920	Rockwell: Postupak mjerenja tvrdoće s uporabom predopterećenja i mjerenja dubine prodiranja indentora
1925	Smith i Sandland otkrivaju Vickers metodu mjerenja tvrdoće
1939	Knoop
1950	Berkovich: trokutna piramida

U današnje vrijeme metode za ispitivanje tvrdoće mogu se podijeliti s obzirom na materijale za koje se primjenjuju. Na taj način možemo ih svrstati u dvije osnovne skupine:

- metode za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala,
- metode za ispitivanje tvrdoće drugih materijala (staklo, keramika, kamen, beton, polimeri i dr.)

Postupci za ispitivanje tvrdoće različiti su za pojedine materijale. Uglavnom postoje tri vrste ispitivanja tvrdoće materijala [3]:

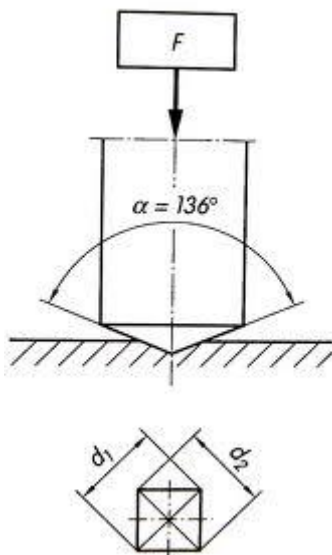
- 1) Ispitivanje tvrdoće zarezom:
 - a) Mohsova skala tvrdoće.
- 2) Ispitivanje tvrdoće utiskivanjem:
 - a) ispitivanje tvrdoće po Brinellu,
 - b) ispitivanje tvrdoće po Vickersu,
 - c) ispitivanje tvrdoće po Rockwellu.
- 3) Ispitivanje tvrdoće odskokom:
 - a) Shoreov postupak.

Metode ispitivanja zarezivanjem primjenjuju se za jako tvrde i krhke materijale, a utiskivanjem za elastičnoplastične materijale. Te dvije metode ispitivanja tvrdoće ubrajaju se u statička ispitivanja, a Shoreov postupak u dinamička ispitivanja tvrdoće.

2.3. Tvrdća po Vickersu

2.3.1 Općenito

Tvrdoća po Vickersu je razvijena u tvrtki Vickers Ltd., kao zamjena za ispitivanja tvrdoće po Brinellu [4]. Kod Vickersove metode uklonjena su dva osnovna nedostatka Brinellove metode: ograničenost područja mjerenja do 450 HB, te ovisnost iznosa tvrdoće o primijenjoj sili utiskivanja kuglice. Prvi nedostatak uklonjen je uporabom najtvrdjeg materijala za penetrator, dijamanta, a drugi oblikom penetratora. To je kod Vickersove metode, prikazano na slici 2.1, četverostrana piramida s kutem od 136° između stranica [1].



Slika 2.1 : Izgled indentora kod Vickersove metode [5]

Kut od 136° nije odabrao slučajno. Taj kut zatvaraju tangencijalne ravnine na Brinellovu kuglicu pri optimalnoj veličini otisnuća $d=0,375 \cdot D$

Po definiciji, tvrdoća po Vickersu jednaka je onoj Brinellovoj, a izračunava se izrazom:

$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{S},$$

pri čemu je:

F - sila utiskivanja (N),

S - ploština otisnuća (šuplje piramide) nakon rasterećenja (mm^2).

Budući da se mjeri dijagonala baze otisnuća (kvadrata), ploština otisnuća izražava se pomoću dijagonale d te izlazi:

$$HV = \frac{F \cdot 0,1891}{d^2},$$

pri čemu je:

d - srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otisnuća (mm).

Uobičajeni iznosi sile kod Vickersove metode iznose od 49 do 980 N. No, mogu se koristiti i niža opterećenja. Ukoliko primijenjena sila utiskivanja iznosi od 1,96 do 49 N, govori se o semimikrotvrdoći. Mjerenje semimikrotvrdoće provodi se prvenstveno pri ispitivanju tvrdoće tankih uzoraka te tankih slojeva. Za mjerenje tzv. mikrotvrdoće rabe se opterećenja niža od 1,96 N.

Na taj način moguće je mjerenje tvrdoća pojedinih faza, npr. kristalnih zrna u mikrostrukturi materijala. Trajanje opterećivanja penetratora iznosi od 10 do 15 s, a iznimno se za mekane materijale može i produljiti.

Vickersova tvrdoća je bezdimenzionalna veličina, a uz iznos tvrdoće navodi se i sila opterećivanja, npr. 430 HV10, što znači da je izmjerena tvrdoća iznosila 430 HV i da je dobivena utiskivanjem penetratora silom od $10 \cdot 9,81$ N u trajanju od 10 do 15 s. Ukoliko je trajanje utiskivanja produljeno, navodi se također u oznaci (npr. 28 HV1/30 znači da je izmjerena tvrdoća iznosila 28 HV, sila utiskivanja $10 \cdot 9,81$ N, a vrijeme 30 s). Minimalna debljina uzorka mnogo je manja nego kod Brinellove metode jer se primjenjuju niža opterećenja i u pravilu iznosi $(1,2-1,5) \cdot d$ (dijagonala otiska). Kod Vickersove metode potrebno je brižljiva priprema mjerne površine koja pogotovo za mjerenje semimikrotvrdoće i mikrotvrdoće uključuje i poliranje uzoraka. Također je zbog sitnog otiska za mjerenje dijagonale potreban mjerni mikroskop [1].

2.3.2. Područje rada

Prema HRN EN ISO 6507-1 postoje tri različita raspona ispitne sile, koje su prikazane u tablici 2.2, kod metalnih materijala za Vickers metodu .

Tablica 2.2: Raspon ispitne sile kod Vickersove metode [6]

Raspon ispitne sile, F N	Simbol tvrdoće	Oznaka
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Konvecionalna tvrdoća
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 do < HV 5	Semimikrotvrdoća
$0,098\ 07 \leq F < 1,961$	HV 0,01 do < HV 0,2	Mikrotvrdoća

2.3.3. Postupak ispitivanja tvrdoće

U principu, ispitivanje se provodi na sobnoj temperaturi u granicama od 10 ° C do 35 ° C.

U tablici 2.3 su navedene preporučene ispitne sile za određenu tvrdoću.

Tablica 2.3: Preporučene ispitne sile za određenu tvrdoću [6]

Konvecionalna tvrdoća		Semimikrotvrdoća		Mikrotvrdoća	
Simbol tvrdoće	Vrijednost ispitne sile, F N	Simbol tvrdoće	Vrijednost ispitne sile, F N	Simbol tvrdoće	Vrijednost ispitne sile, F N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

Ispitni komad treba staviti na čvrstu podlogu. Ta podloga mora biti čista i slobodna od stranih tvari (ulje, prljavština, itd.). Važno je da ispitni komad leži čvrsto na podlozi, tako da se ne može micati tijekom ispitivanja.

Indentor u kontaktu s površinom epruvete mora biti okomit na ispitnu površinu, bez udara ili vibracija, sve dok ispitna sila ne dosegne određenu vrijednost. To vrijeme ne smije biti veće od 8 sekunde ni manje od 2 sekunde. Za semimikrotvrdoću i mikrotvrdoću, maksimalno vrijeme ne smije prelaziti 10 s. Brzina približavanja indentora ne smije prelaziti 0,2 mm / s.

Tijekom ispitivanja, tvrdomjer mora biti zaštićen od udara ili vibracija.

Udaljenost između središta otiska i ruba epruvete mora biti najmanje 2,5 puta prosječna duljina dijagonale za mjerenje tvrdoće na uzorcima od čelika, bakra i bakrenih legura, a najmanje tri puta prosječna dužina dijagonale u slučaju lakih metala, olova, kositra i njihovih legura.

Za izračun Vickersove tvrdoće treba uzeti aritmetičku sredinu dviju izmjerenih duljina dijagonala. Na ravnim površinama, razlika između dužine dviju dijagonala ne bi trebala biti veća od 5 %. Ako je razlika veća, to treba navesti u izvještaju o ispitivanju [6].

2.3.4. Ispitni uzorak

Ispitivanje se provodi na površini koja je glatka i ravna, slobodna od oksida, stranih tvari i posebnice, potpuno slobodan od maziva, osim ako nije drugačije navedeno.

Priprema se provodi na takav način, da se svaka promjena površinske tvrdoće, na primjer zbog prekomjernog zagrijavanja ili hladnog rada, minimizira.

Debljina epruvete ili sloja koji se ispituje, mora biti veći 1,5 puta od duljine dijagonale otiska. Nakon ispitivanja na nalijegajućoj površini uzorka ne smiju biti vidljive deformacije.

Za ispitne epruvete malog presjeka ili nepravilnog oblika, treba osigurati neki oblik dodatnog prihvata da ne dođe do pomicanja pri mjerenju [6].

2.3.5. Prednosti i nedostaci

Prednosti metode [7]:

- tvrdoća je neovisna o primjenjenoj sili,
- moguće je mjerenje tvrdoće i najtvrdijih materijala,
- moguće je mjerenje tvrdoće vrlo tankih uzoraka te čak tvrdoća pojedinih zrna (kristala) ,
- otisak je vrlo malen pa ne oštećuje površinu.

Nedostaci metode [7]:

- potrebna brižljiva priprema površine uzorka na kojem se obavlja mjerenje,
- za mjerenje veličine otiska potreban je mjerni mikroskop.

3. TEORIJSKE OSNOVE ZA PROCJENU MJERNE NESIGURNOSTI

Da bi mjerni rezultat bio uporabiv i usporediv s ostalim sukladnim mjernim rezultatima, on osim što mora biti jasno i nedvosmisleno iskazan, mora sadržavati i iskazivati kolika su moguća odstupanja od tog mjernog rezultata. Također, bitno je da li je mjerenje provedeno jednom ili je rezultat više uzastopnih mjerenja. Svi ovi podaci sastavni su dio mjernog postupka i više ili manje utječu na mjerni rezultat i kao takvi zaslužuju da ih se u rezultat i uvrsti. Uspoređujući više mjernih rezultata (istih mjernih veličina) koji su rezultat relativno stabilnih mjernih postupaka (uključujući mjernu opremu, mjeritelja i procjenu mjernih rezultata) vidi se da između njih postoje razlike. Ove razlike su nepredvidive i upućuju na uporabu teorije vjerojatnosti pri obradi mjernih rezultata.

Način iskazivanja mjernih rezultata jest:

mjerni rezultat = najbolja procjena mjerne veličine + mjerna nesigurnost

Mjerna veličina je posebna veličina koja se mjeri. Mjerna veličina je približno jednaka definiranoj odnosno stvarnoj mjernoj vrijednosti. Ova razlika između "prave" i "slučajne" mjerne veličine je također sastavni dio nesigurnosti mjernog rezultata, koji je također "slučajna" a ne "prava" veličina [8].

Definicija mjerne nesigurnosti glasi: "Mjerna nesigurnost je parametar koji je pridružen mjernom rezultatu i kojim se obilježava rasipanje rezultata koji se može pridružiti mjernoj veličini" [8].

Točna (stvarna) vrijednost mjerne veličine se ne može izravno izmjeriti. Svaka vrijednost mjerene veličine je dio populacije koja ima određenu matematičku očekivanost točne vrijednosti mjerene veličine i najmanje očekivano odstupanje od te točne vrijednosti [8].

3.1. Procjena standardne nesigurnosti

Standardna nesigurnost $u(x_i)$ procjenjuje se na dva načina.

Jedan način je procjena koja se temelji na statističkoj procjeni rezultata (analizi ponovljenih mjerenja – izravno mjerenih veličina) i zove se "Procjena standardne nesigurnosti vrste A". Ovdje je mjera nesigurnosti procijenjeni normni odmak srednje vrijednosti.

Drugi način je procjena koja se ne temelji na ponovljenim mjerenjima, nego na iskustvu, prije izmjerenim podacima iz umjernica i slično, zove se "Procjena standardne nesigurnosti vrste B". Procjena standardne nesigurnosti vrste B postupa s nestatički procijenjenim standardnim odmacima kao s onim koji su procijenjeni na statistički način [8].

3.1.1. Procjena standardne nesigurnosti vrste A

Ako je mjerni postupak moguće organizirati tako da je broj ponovljenih mjerenja jedne te iste ulazne veličine velik ($n > 30$), onda se može tvrditi da je riječ o normalnoj (Gaussovoj) razdiobi s $\eta = n - 1$ stupnjeva slobode. Tada nije nužno računati stvarni broj stupnjeva slobode. Ako je broj opetovanih mjerenja mali i ako razdioba nije poznata, a radi se o razdiobi aritmetičkih sredina uzoraka, može se rabiti Studentova razdioba. Studentova se razdioba po definiciji za veliki broj ponovljenih pokusa približava normalnoj [8].

3.1.2. Procjena standardne nesigurnosti vrste B

Kada se procjena očekivane vrijednosti ne određuje iz ponovljenih mjerenja, standardna nesigurnost, $u(x_i)$, se procjenjuje temeljem svih raspoloživih podataka o mjerenoj veličini. Postupak procjene standardne nesigurnosti vrste B zahtjeva znanje i iskustvo mjeritelja. Važno je ponoviti da se procjena standardne nesigurnosti vrste B može procijeniti na jednako precizan način i u skladu sa statističkim zakonitostima kao i vrste A, ako se posjeduje dovoljno mjeriteljskog iskustva i znanja o mjerenom procesu kojemu se mjerna nesigurnost procjenjuje. Sve procijenjene ulazne veličine (x_i) koje se ne podvrgavaju višekratnim mjerenjima (vrsta B), mogu se također opisati određenom vjerojatnosnom razdiobom i svaka se vjerojatnosna razdioba može obilježiti izvjesnim normnim odmakom koji se pak može rabiti kao mjera nesigurnosti određene ulazne veličine.

Procjena standardne nesigurnosti vrste B odvija se prema sljedećem algoritmu [8]:

1. korak – pretpostaviti promjenu ulazne veličine (najveću ili najvjerojatniju),
2. korak – pretpostavljenoj promjeni pridijeliti vjerojatnosnu razdiobu (pravokutna, trokutna),
3. korak – za pridijeljenu razdiobu izračunati standardni odmak,
4. korak – izjednačiti taj standardni odmak s procijenjenom nesigurnosti i pridružiti ga procijenjenoj vjerojatnosti ulazne veličine.

3.2 Određivanje proširene i sastavljene mjerne nesigurnosti

Sastavljena standardna nesigurnost (u_c) se iskazuje u obliku standardnih odmakata i obveza je (prema HRN ISO/IEC 17025:2000) iskazivati je bilo u ispitnim laboratorijima bilo u umjernim laboratorijima. Također, nužno je rabiti i pri iskazivanju rezultata u međulaboratorijskim usporedbama.

Proširena mjerna nesigurnost (U), se rabi kad je potrebno iskazivati nesigurnost koja obuhvaća široki raspon vjerojatnosne razdiobe, a koju obilježavaju mjerni rezultati i sastavljena nesigurnost:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (3.1)$$

gdje je k - faktor pokrivanja uz određenu razinu povjerenja.

Dakle, proširena nesigurnost je dodatna mjera nesigurnosti koja određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća veliki dio razdiobe vrijednosti koje se razumno mogu pridružiti mjernoj veličini.

Mjerni se rezultat tada izražava kao:

$$Y = y \pm U \quad (3.2)$$

Što znači da je y najbolja procjena vrijednosti koja se može pripisati mjernoj veličini Y , dok je $(y - U; y + U)$ interval za koji se očekuje da obuhvaća onoliko veliki dio razdiobe vrijednosti koje se razumno mogu pripisati veličini Y .

Ako su sve sastavnice sastavljene standardne nesigurnosti $u_c(y)$ dobivene proračunima vrste A, onda se ovaj interval zove interval povjerenja, dok se razinom povjerenja naziva onaj (veliki) dio razdiobne vrijednosti koje se razumno mogu pripisati veličini Y .

Kolika je razina povjerenja, određuje se pomoću faktora pokrivanja (k). Primjerice kod normalne razdiobe, za razinu povjerenja od 95% ili 99%, faktor pokrivanja iznosi 2, odnosno 3. Odavde proizlazi da je za ispravan odabir faktora pokrivanja (razine povjerenja) nužno znati o kojoj je razdiobi riječ. Zapravo, proširena se nesigurnost ne može iskazati ako se dobro ne poznaje razdioba vrijednosti [8].

3.3. Postupak određivanja mjerne nesigurnosti

Ovo je postupak koji treba slijediti pri procjenama mjerne nesigurnosti [9]:

1. Izraziti matematičku ovisnost mjerene (izlazne) veličine Y o ulaznim veličinama X_i prema jednadžbi $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$. Funkcija f mora sadržavati sve veličine, uključivo ispravke i korekcijske faktore, koji mogu značajnije pridonijeti nesigurnosti mjernog rezultata.
2. Odrediti x_i , koji je procijenjena vrijednost ulaznih veličina X_i i, bilo na temelju statističke analize niza opažanja ili na neki drugi način.
3. Procijeniti standardnu nesigurnost $u(x_i)$ za svaki procijenjeni x_i . Mjeritelj mora procijeniti i odabrati postupak prema A ili B vrsti procjene nesigurnosti.
4. Procijeniti kovarijance pridružene svakoj ulaznoj veličini za koju se procjenjuje da korelira s nekom drugom.
5. Proračunati mjerni rezultat, tj. njegovu procjenu umjerene veličine Y iz funkcijskog odnosa f tako da se za ulazne veličine X_i rabe procijenjeni x_i .
6. Odrediti sastavljenu standardnu mjernu nesigurnost $u_c(y)$ mjernog rezultata y uporabivši standardne nesigurnosti i kovarijance pridružene procijenjenim ulaznim veličinama. Ako mjerenje određuje više od jedne izlazne veličine, odrediti njihove kovarijance.
7. Ako je potrebno, iskazati proširenu mjernu nesigurnost U , s nakanom da se odredi raspon $y-U$ do $y+U$, za koji se može očekivati da će sadržavati veliki dio razdiobe vrijednosti koja se razborito pripisuje mjerenoj veličini Y .
8. Iskazati rezultat zajedno sa sastavljenom standardnom mjernom nesigurnošću $u_c(y)$ ili proširenom mjernom nesigurnošću U . Potrebno je opisati postupak kako su dobivene ove nesigurnosti.

3.4. Parametri koji utječu na nesigurnost mjerenja tvrdoće

Razni parametri utječu na nesigurnost mjerenja tvrdoće u većem ili manjem opsegu, a podijeljeni su u grupe prema mjestu nastanka:

- ispitni uzorak,
- uređaj za mjerenje tvrdoće,
- okoliš,
- mjeritelj.

U tablici 3.1 se navode izvori nesigurnosti, koji značajno mogu doprinijeti ukupnoj nesigurnosti mjerenja tvrdoće.

Tablica 3.1: Izvori nesigurnosti mjerenja tvrdoće [10]

Utjecajni faktori	Izvori nesigurnosti
Ispitni uzorak	Mala debljina ispitnog uzorka
	Krutost pomoćnih dijelova
	Hrapavost površine
	Veličina zrna u mikrostrukturi
	Nehomogena raspodjela tvrdoće
	Čistoća površina
Tvrdomjer	
a) okvir tvrdomjera	Gubici uslijed trenja
	Elastična odstupanja
	Nagib držača indentora
b) sposobnost mjernog sustava	Greška pokazivanja
	Slaba rezolucija
	Nelinearnost
	Histereza
c) postrani mjerni sustav	Greška pokazivanja
	Slaba rezolucija
	Numerički otvor objektiva ili osvjetljenja
	Nehomogenost osvjetljenja otiska
d) sustav opterećivanja	Odstupanje od nominalne sile
	Odstupanje od vremenskog intervala ciklusa
	Uvođenje sile
	Prekoračenje vrijednosti sile
e) indentor	Odstupanje od idealnog oblika
	Oštećenja
	Deformacija pod djelovanjem sile
Okoliš	Temperatura odstupanja ili strujanje zraka
	Vibracije ili udarci
Mjeritelj	Pogrešan izbor metode
	Rukovanje, očitavanje, procjena pogrešaka

4. UMJERAVANJE TVRDOMJERA

4.1. Značenje umjeravanja

Prema Međunarodnom mjeriteljskom rječniku, "umjeravanje je radnja kojom se pod određenim uvjetima u prvome koraku uspostavlja odnos između vrijednosti veličine s mjernim nesigurnostima koje daju mjerni etaloni i odgovarajućih pokazivanja kojima su pridružene mjerne nesigurnosti, a u drugome koraku ti se podaci upotrebljavaju za uspostavljanje odnosa za dobivanje mjernog rezultata iz pokazivanja" [11].

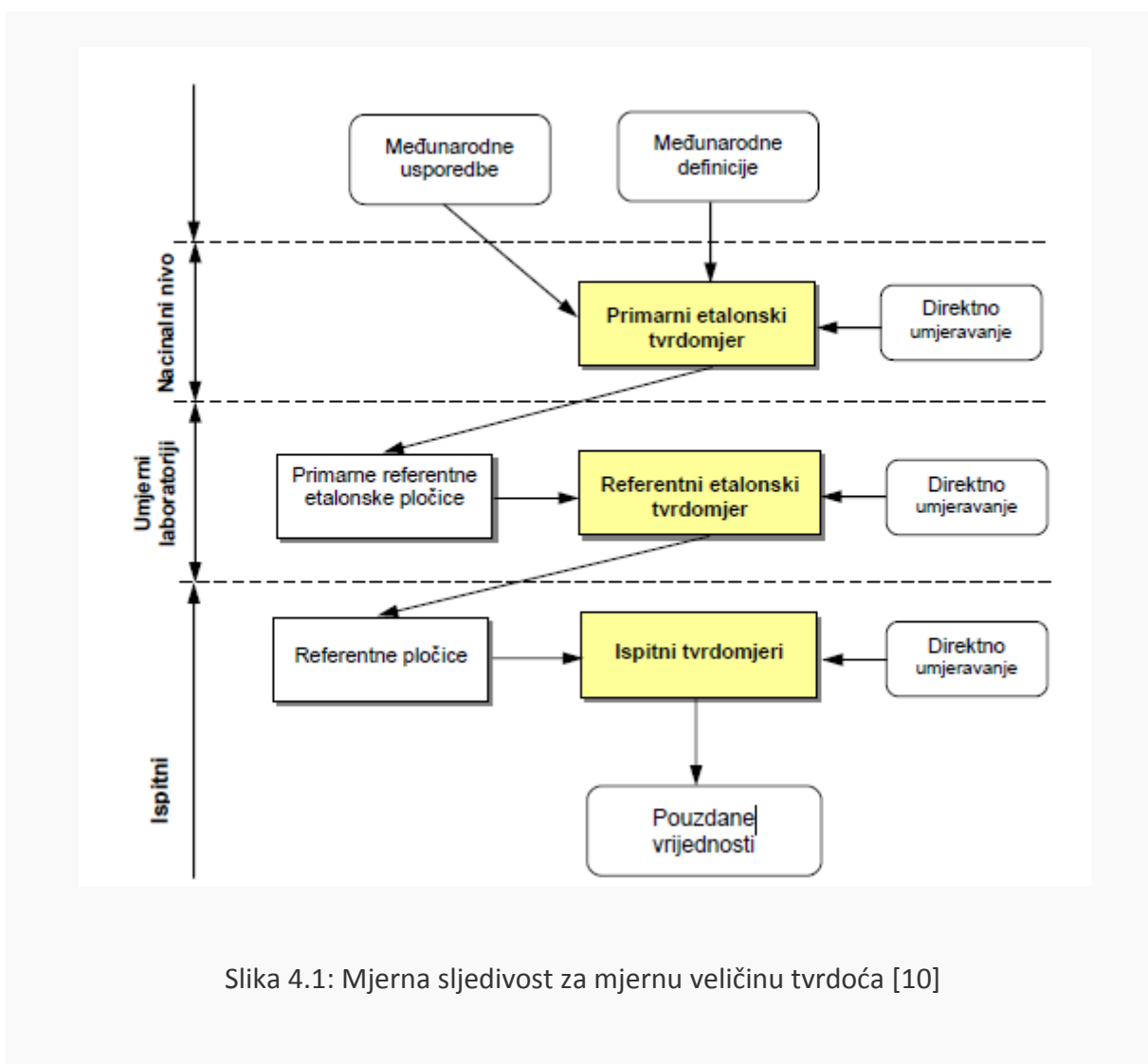
Umjeravanje mjerila provodi se umjernim etalonima, tj. mjerilima koja služe kao referenca za utvrđivanje vrijednosti veličina i pridružene mjerne nesigurnosti za dodjelu mjernih rezultata druge veličine iste vrste, uspostavljajući mjeriteljsku sljedivost. Mjerni etalon precizniji je od mjerila, na višoj je razini hijerarhijske ljestvice sljedivosti i ima manju mjernu nesigurnost od mjerila koja se njime umjeravaju. Umjeravanjem mjerila se dobije informacija koliko uređaj odstupa od vrijednosti koja bi se dobila mjerenjem s primarnim etalom (etalon prema kojemu se ostvaruje sljedivost, tj. kojemu je mjerna nesigurnost jednaka nuli), a ovisno o uređaju i druge važne informacije za utvrđivanje kako se pokazivanje mjerila može dovesti u vezu s primarnim etalom [11].

4.1.2. Mjerna sljedivost

Mjerna sljedivost definira se kao svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s navedenom referencom dokumentiranim neprekinutim lancem umjeravanja, od kojih svako doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Pod referencom se podrazumijeva definicija mjerne jedinice, mjerni postupak ili mjerni etalon. Mjeriteljska sljedivost zahtijeva uspostavljenu hijerarhiju umjeravanja. Međunarodna organizacija za akreditaciju laboratorija, ILAC, smatra da su elementi potrebni za priznavanje mjeriteljske sljedivosti: neprekidan lanac mjeriteljske sljedivosti prema međunarodnom mjernom etalonu ili nacionalnom mjernom etalonu, dokumentirana mjerna nesigurnost, dokumentirani mjerni postupak, akreditirana tehnička sposobnost, mjeriteljska sljedivost prema SI-u i razdoblja umjeravanja.

Nacionalni mjeriteljski institut (National Metrology Institute, NMI) tijelo je koje se imenuje nacionalnom odlukom za razvoj i održavanje nacionalnih mjernih etalona jedne ili više veličina. Odgovoran je za mjeriteljsku sljedivost veličina neke države te predstavlja istu u

međunarodnim odnosima prema drugim nacionalnim mjeriteljskim institutima, regionalnim mjeriteljskim organizacijama i prema Međunarodnom uredu za utege i mjere (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM). BIPM ima ulogu pohranjivanja međunarodnih pramjera, mjeriteljskog razvoja i međunarodnog uspoređivanja etalona različitih veličina za potrebe zemalja članica. Nacionalni mjeriteljski institut neke države na usluzi je umjernim laboratorijima te države da ostvare sljedivost svojih mjernih etalona. Umjerni laboratoriji daju usluge umjeravanja ispitnim laboratorijima, poduzećima i drugim krajnjim korisnicima koji trebaju usluge umjeravanja svojih radnih etalona ili mjerila [11]. Lanac sljedivosti za mjernu veličinu tvrdoća prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1: Mjerna sljedivost za mjernu veličinu tvrdoća [10]

Opisana mjerna sljedivost prema SI jedinicama uglavnom je primjenjiva na fizikalne veličine, međutim, postoje situacije gdje sljedivost prema SI jedinicama nije moguća i koja se ne može ostvariti neprekinutim lancem umjeravanja. U takvim slučajevima pribjegava se drugim načinima ostvarivanja mjerne sljedivosti kao što je sljedivost prema certificiranim referentnim materijalima, dogovorenim metodama i normama prihvaćenim konsezzusom [12].

4.2. Postupak umjeravanja tvrdomjera

Prije nego Vickersovo ispitivanje tvrdoće bude ovjereno, tvrdomjer mora biti provjeren kako bi se osiguralo da je pravilno postavljen u skladu s uputama proizvođača. Provjera se provodi prema normi HRN EN ISO 6507-2. Prema normi postupak provjere može se provesti pomoću dvije metode:

- Direktna metoda umjeravanja - osigurava da tvrdomjeri funkcioniraju pravilno, shodno definiciji tvrdoće i uzimajući u obzir odgovarajuće parametre.
- Indirektna metoda umjeravanja s etalonskim pločicama tvrdoće – obuhvaća provjeru karakteristika tvrdomjera kao cjeline.

4.3. Direktna metoda umjeravanja tvrdomjera

Direktna metoda se provodi na temperaturi 23 ± 5 °C. Ako je umjeravanje napravljeno izvan tog temperaturnog područja onda se to mora posebno naglasiti te provesti procjenu utjecaja temperature na sve parametre.

Direktna metoda umjeravanja se sastoji od [13]:

- a) provjere sila opterećivanja,
- b) provjere dijamantnog indentora,
- c) provjere sustava za očitavanje veličine otiska,
- d) provjere ispitnog ciklusa.

4.3.1. Provjere sila opterećivanja

Svaka sila opterećivanja koju koristimo unutar radnog raspona tvrdomjera mora biti izmjerena. Provjera sila opterećivanja provodi se u tri različita položaja sustava za opterećivanje. Svako mjerenje sile opterećivanja mora biti unutar granice odstupanja kako je prikazano u tablici 4.1.

Tablica 4.1: Dozvoljeno odstupanje sila opterećivanja [13]

Sila opterećivanja, F N	dozvoljeno odstupanje silam opterećivanja, %
$F \geq 1,961$	$\pm 1,0$
$0,098\ 07 \leq F < 1,961$	$\pm 1,5$

4.3.2 Provjere sustava za očitavanje veličine otiska

Rezolucija mjernog uređaja određuje se prema veličini mjerenja najmanjeg otiska. Skala mjernog uređaja treba biti podijeljena tako da omogući procjenu dijagonala prema tablici 4.2.

Tablica 4.2: Podjela rezolucije mjernog uređaja i maksimalno dozvoljene pogreške prema duljini dijagonale kod direktne metode [13]

Duljina dijagonale, d mm	Rezolucija mjernog uređaja	Maksimalno dozvoljena pogreška
$d \leq 0,040$	0,0002 mm	0,0004 mm
$0,040 < d \leq 0,200$	0,5 % od d	1,0 % od d
$d > 0,200$	0,001 mm	0,002 mm

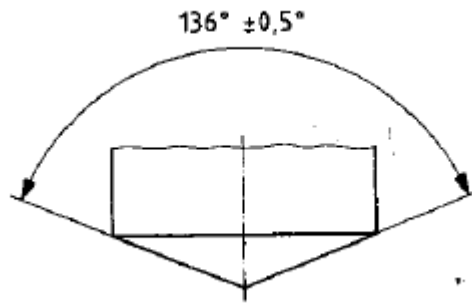
Mjerni uređaj treba provjeriti objektmikrometrom u najmanje pet točaka za svako radno područje. Maksimalno dozvoljena pogreška ne smije prekoračiti vrijednosti dane u tablici 4.2.

4.3.3 Provjere dijamantnog indentora

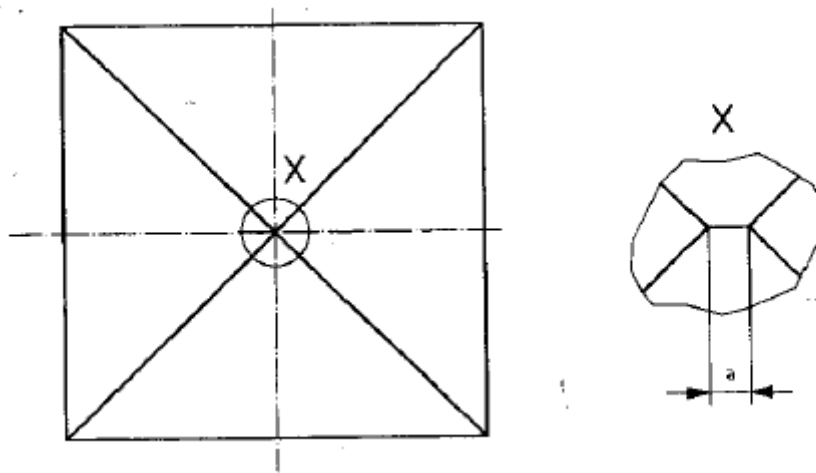
Površina četverostrane piramide mora biti polirana i bez oštećenja. Provjera oblika indentora može se provjeriti direktnim mjerenjem ili mjerenjem njegove projekcije. Kut između nasuprotnih strana površine dijamantne piramide indentora mora biti $136^\circ \pm 0,5^\circ$ kao što je prikazano na slici 4.2. Kut između osi dijamantne piramide i osi držača indentora ne smije biti veći od $0,50^\circ$. Sve četiri strane piramide na vrhu moraju završavati u jednoj točki kao što je prikazano na slici 4.3. Maksimalne dozvoljene duljine vršnog brida indentora dane su u tablici 4.3.

Tablica 4.3: Maksimalno dozvoljena duljina vršnog brida [13]

Ispitna sila, F N	Maksimalno dozvoljena duljina vršnog brida, a mm
$F \geq 49,03$	0,002
$1,961 \leq F < 49,03$	0,001
$0,09807 \leq F < 1,961$	0,0005



Slika 4.2: Kut između nasuprotnih strana površine dijamantne piramide indentora [13]



Slika 4.3: Završetak piramide indentora [13]

4.3.4. Provjera ispitnog ciklusa

Ispitni ciklus provjerava se s tolerancijom od $\pm 1,0$ s. Provjera se provodi pomoću mjernog sata .

4.4. Indirektna metoda umjeravanja tvrdomjera

Indirektna metoda umjeravanja mora biti provođena na temperaturi 23 ± 5 °C. Ako je umjeravanje napravljeno izvan tog temperaturnog područja onda se to mora posebno naglasiti te provesti procjenu utjecaja temperature na sve parametre. Za svaku silu opterećivanja moraju biti upotrijebljene najmanje dvije različite etalonske pločice iz sljedećih različitih područja:

- ≤ 225 HV
- 400 HV – 600 HV
- > 700 HV

Za svaku etalonsku pločicu razlika između srednje izmjerene vrijednosti i potvrđene sredine dijagonale ne smije prelaziti maksimum dozvoljene pogreške dane u tablici 4.4.

Tablica 4.4: Podjela rezolucije mjernog sustava i maksimalno dozvoljene pogreške prema duljini dijagonale kod indirektna metode [13]

Duljina dijagonale, d mm	Rezolucija mjernog sustava	Maksimalna dozvoljena pogreška
$d \leq 0,040$	0,0002 mm	0,0004 mm
$0,040 < d \leq 0,200$	0,5% od d	1,0 % od d
$d > 0,200$	0,001 mm	0,002 mm

Na svakoj etalonskoj pločici treba provesti pet mjerenja. Ispitivanja treba provesti po HRN EN ISO 6507-1. Za svako mjerenje dobije se srednja vrijednost izmjerenih dviju dijagonala otiska a na kraju se dobije niz mjernih rezultata d_1 ; d_2 ; d_3 ; d_4 ; d_5 poredan po rastućem iznosu. Na temelju toga se računa srednja vrijednost prema izrazu:

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5}{5} \quad (4.1)$$

Ponovljivost tvrdomjera r računa se prema izrazu:

$$r = d_5 - d_1 \quad (4.2)$$

Relativna ponovljivost izražena u postocima računa se prema izrazu

$$r_{rel} = 100 \times \frac{d_5 - d_1}{\bar{d}} \quad (4.3)$$

Ponovljivost mora zadovoljavati uvijete dane u tablici 4.5.

Tablica 4.5: Granice ponovljivosti tvrdomjera [13]

Tvrdća etalonske pločice	Ponovljivost tvrdomjera						
	$r_{rel}, \%$			r, HV			
	HV5- HV100	HV 0,2- 0,5	< HV 0,2	HV 5-HV100		HV 0,2-HV 5	
				Tvrdća etalonske pločice	HV	Tvrdća etalonske pločice	HV
$\leq 225 HV$	3,0	6,0	9,0	100	6	100	12
				200	12	200	24
$> 225 HV$	2,0	4,0	5,0	250	10	250	20
				350	14	350	28
				600	24	600	48
				750	30	750	60

Pogreška točnosti E tvrdomjera izračunava se prema izrazu:

$$E = \bar{H} - H_c \quad (4.4)$$

gdje je:

H_c - nazivna vrijednost tvrdoće etalonske pločice,

\bar{H} - aritmetička sredina mjerene tvrdoće koja se izračunava prema izrazu:

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5}{5} \quad (4.5)$$

gdje je:

H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 - tvrdoća odgovarajućih izmjerenih dijagonala d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 .

Relativna pogreška točnosti u postocima računa se prema izrazu:

$$E_{\text{rel}} = 100 \times \frac{\bar{H} - H_c}{H_c} \quad (4.6)$$

Maksimalna pogreška točnosti tvrdomjera izražena u postocima ne smije prekoračiti vrijednosti dane u tablici 4.6 .

Tablica 4.6: Maksimalno dozvoljena pogreška točnosti tvrdomjera [13]

Simbol tvrdoće	Maksimalna dozvoljena pogreška točnosti tvrdomjera, E_{rel} , %															
	Tvrdoća, HV															
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1500
HV 0,01																
HV 0,015	10															
HV 0,02	8															
HV 0,025	8	10														
HV 0,05	6	8	9	10												
HV0,1	5	6	7	8	8	9	10	10	11							
HV 0,2		4				8		9		10	11	11	12	12		
HV 0,3		4				6		7		8	9	10	10	11	11	
HV 0,5		3				5		6		6	7	7	8	8	9	11
HV 1		3				4		4		5	5	5	6	6	6	8
HV 2		3				3		4		4	4	4	4	5	5	6
HV 3		3				3		3		3	4	4	4	4	4	5
HV 5		3				3		3		3	3	3	3	3	4	4
HV 10		3				3		3		3	3	3	3	3	3	3
HV 20		3				3		3		3	3	3	3	3	3	3
HV 30		3				2		2		2	2	2	2	2	2	2
HV50		3				2		2		2	2	2	2	2	2	2
HV 100						2		2		2	2	2	2	2	2	2

4.5. Procjena mjerne nesigurnosti umjeravanja tvrdomjera

Potpunu procjenu mjerne nesigurnosti treba izvršiti u skladu s ISO uputama za iskazivanje mjerne nesigurnosti. Neovisno o vrsti tvrdoća, postoje dvije mogućnosti za određivanje mjerne nesigurnosti.

Jedna od mogućnosti je na temelju procjene svih relevantnih izvora koji se pojavljuju tijekom izravnog umjeravanja.

Druga mogućnost je na temelju posrednog umjeravanja pomoću etalona tvrdoće referentne vrijednosti.

4.5.1 Procjena mjerne nesigurnosti kod direktne metode

4.5.1.1. Nesigurnost ispitne sile

Sastavljena relativna standardna mjerna nesigurnost umjeravanja ispitne sile računa se prema sljedećem izrazu:

$$u_F = \sqrt{u_{FRS}^2 + u_{FHTM}^2} \quad (4.7)$$

gdje je:

u_{FRS} - je relativna mjerna nesigurnost prijenosnog etalona sile,

u_{FHTM} – je relativna mjerna nesigurnost izmjerenih sila opterećivanja.

Mjerna nesigurnost referentnih instrumenata, pretvarača sile, je navedena u odgovarajućim certifikatima za umjeravanje. Veličine koje utječu na njihovu točnost su:

- temperatura pri umjeravanju,
- nestabilnost kroz duže vremensko razdoblje,
- interpolacija.

Relativna mjerna nesigurnost prijenosnog etalona sile se uzima iz umjerenih certifikata. Relativna mjerna nesigurnost izmjerenih vrijednosti sila se procjenjuje metodom B, pravokutnom razdiobom.

4.5.1.2. Provjera sustava za očitavanje veličine otiska

Sastavljena relativna standardna mjerna nesigurnost referentnog instrumenta za očitavanje veličine otiska računa se prema izrazu:

$$u_L = \sqrt{u_{LRS}^2 + u_{ms}^2 + u_{LHTM}^2} \quad (4.8)$$

gdje je:

u_{LRS} - je relativna mjerna nesigurnost objektmikrometra,

u_{ms} - je relativna mjerna nesigurnost ovisna o rezoluciji mjernog sistema,

u_{LHTM} - je relativna mjerna nesigurnost optičkog mjernog sustava,

Mjerna nesigurnost referentnog instrumenta za mjerenje veličine otiska, objektmikrometara, je navedena u odgovarajućim certifikatima za umjeravanje.

4.5.2. Procjena mjerne nesigurnosti kod indirektna metode

Mjerna nesigurnost kod indirektnog umjeravanja tvrdomjera utvrđuje se prema izrazu:

$$u_{HTM} = \sqrt{u_{CRM}^2 + u_{CRM-D}^2 + u_H^2 + u_{ms}^2} \quad (4.9)$$

gdje je:

u_{CRM} - je relativna mjerna nesigurnost etalonskih pločica,

u_{CRM-D} - je relativna mjerna nesigurnost promjene etalonskih pločica kroz duže razdoblje,

u_H - je relativna mjerna nesigurnost rezultata mjerenja i razdiobe B,

u_{ms} - je relativna mjerna nesigurnost ovisna o rezoluciji tvrdomjera.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Plan istraživanja

Za eksperimentalni dio uzeta su dva različita tvrdomjera koji se nalaze u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Da bi se utvrdile njihove mjerne sposobnosti provedeno je njihovo umjeravanje sukladno normi HRN EN ISO 6507-2.

Umjeravanje se sastoji od:

- Direktne metode:
 - provjere sila opterećivanja,
 - provjere sustava za očitavanje veličine otiska,
 - provjere ispitnog ciklusa.
- Indirektne metode:
 - umjeravanje etalonskim pločicama.

Sva istraživanja su provedena za metodu HV1 gdje je opterećenje bilo 9,807 N.

Nakon toga su provedena mjerenja tvrdoća na uzorcima s ovim tvrdomjerima, te su uspoređeni rezultati mjerenja.

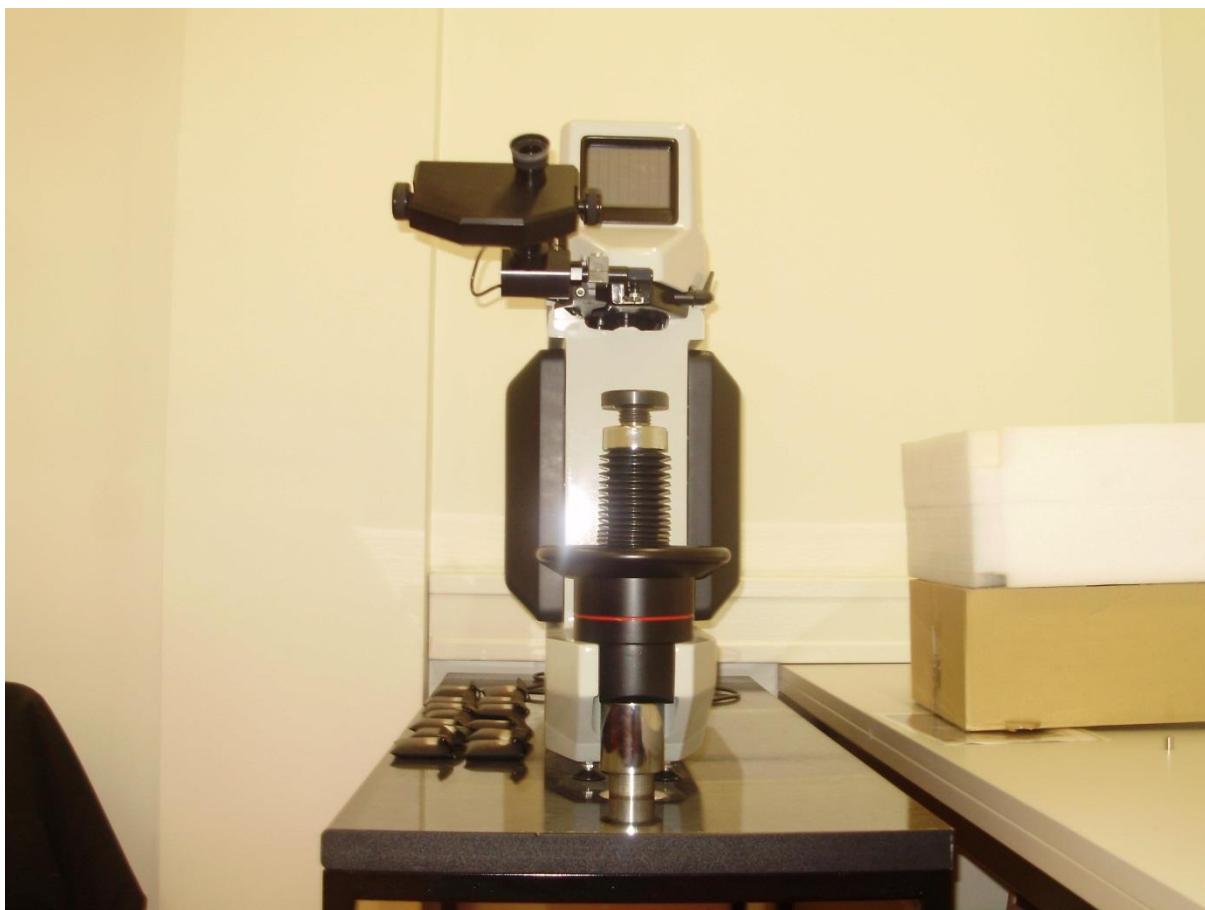
5.2 Tvrdomjeri

Osnovne komponente svakog tvrdomjera su mehanizam za ostvarivanje odgovarajuće sile opterećivanja i dio za mjerenje duljine otiska ili dubine prodiranja indentora u ispitni uzorak. Umjeravanje je provedeno na dva tvrdomjera. Na slici 5.1 je prikazan tvrdomjer njemačkog proizvođača ZWICK tipa 3212001, serijskog broja 115696. Kod tog tvrdomjera sila utiskivanja ostvaruje se direktno pomoću utega. Na njemu je moguće provesti ispitivanja tvrdoće po metodi Vickers sa sljedećim opterećenjima: HV0,1; HV0,2; HV0,3; HV0,5; HV1; HV2; HV3; HV5 i HV10.



Slika 5.1: Tvrdomjer ZWICK tip 3212001

Na slici 5.2 je prikazan tvrdomjer engleskog proizvođača INDENTEC tip 5030TKV, serijskog broja 053081. Tvrdomjer silu utiskivanja ostvaruje pomoću poluga i utega odgovarajuće mase. Na njemu je moguće provesti ispitivanja tvrdoće po metodi Vickers sa sljedećim opterećenjima: HV1; HV2; HV3; HV5; HV10; HV20; HV30 i HV50.



Slika 5.2: Tvrdomjer INDENTEC tip 5030 TKV

5.3 Provjera i umjeravanje tvrdomjera

5.3.1 Provjera sila

Za ispitivanje sile opterećivanja korišten je dinamometar njemačkog proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik, tip Z30, nazivne sile 100 N (2mV/V), serijskog broja 052830060 koji je prikazan na slici 5.3 i mjerno pojačalo GTM (Gassmann Theiss Messtechnik), vrste LT-digitizer, serijskog broja 51006. Dinamometar je umjeren u nacionalnom etalonu sile Njemačke u PTB-u, Braunschweig. Na temelju rezultata umjeravanja svrstan je u klasu 00 sukladno normi HRN EN ISO 376. Mjerna sposobnost mu je $\leq 0,07\%$.



Slika 5.3: Dinamometar za ispitivanje sile opterećivanja

Provjera ispitnih sila provedena je u tri niza na tri različita položaja po tri mjerenja. U tablici 5.1 se nalaze rezultati provjere sile na tvrdomjeru INDENTEC, a u tablici 5.2 su rezultati umjeravanja sila na tvrdomjeru ZWICK.

Tablica 5.1: Rezultati umjeravanja sile na tvrdomjeru INDENTEC

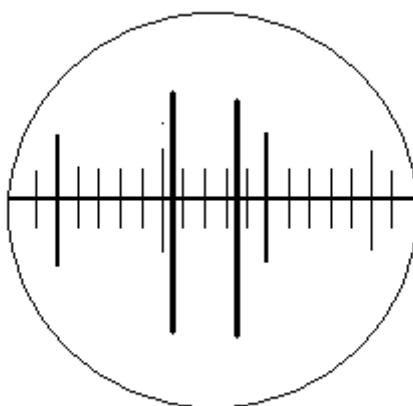
Br. mjerjenja	F_N N	F_N mV/V	Izmjerene sile			F_{sred} mV/V	F_{sred} N	$q, \%$	$b, \%$	$U, \%$
			F_1 mV/V	F_2 mV/V	F_3 mV/V					
1	9,80665	0,19617	0,19691	0,19687	0,19673	0,19684	9,8401	-0,34	0,09	$\pm 0,13$
2	9,80665	0,19617	0,19682	0,19690	0,19691	0,19688	9,8421	-0,36	0,05	$\pm 0,12$
3	9,80665	0,19617	0,19690	0,19691	0,19688	0,19690	9,8431	-0,37	0,02	$\pm 0,12$

Tablica 5.2: Rezultati umjeravanja sile na tvrdomjeru ZWICK

Br. mjerjenja	F_N N	F_{N_0} mV/V	Izmjerene sile			F_{sred} mV/V	F_{sred} N	$q, \%$	$b, \%$	$U, \%$
			F_{1_0} mV/V	F_{2_0} mV/V	F_{3_0} mV/V					
1	9,80665	0,19617	0,19599	0,19590	0,19594	0,19594	9,79515	0,12	0,05	$\pm 0,12$
2	9,80665	0,19617	0,19555	0,19586	0,19587	0,19576	9,78615	0,21	0,16	$\pm 0,16$
3	9,80665	0,19617	0,19599	0,19583	0,19581	0,19588	9,79215	0,15	0,09	$\pm 0,13$

5.3.2. Provjera sustava za očitavanje veličine otiska

Provjera sustava se provodi pomoću objektmikrometara. Korišten je objektmikrometar nazivne duljine 1 mm koji je umjeren u Laboratoriju za precizna mjerenja duljine FSB-a. Postupak se provodi tako da se preko leća u okularu promatra skala i dvije mjerne linije kao što je prikazano na slici 5.4. Dovođenjem unutrašnjih stranica mjernih linija na određenu mjernu duljinu skale direktno se očitavaju vrijednosti.



Slika 5.4 : Način provjere sustava za očitavanje

U tablici 5.3 se nalaze očitani podaci za INDENTEC, a u tablici 5.4 su očitani podaci za ZWICK.

Tablica 5.3: Rezultati provjere veličine otiska na tvrdomjeru INDENTEC

Inducirana, mm	Duljina				Pogreška		Proširena mjerna nesigurnost %
	l_1 , mm	l_2 , mm	l_3 , mm	l_{sr} , mm	mm	%	
0,02	0,0202	0,0202	0,0201	0,0202	0,0002	0,0001	0,44
0,04	0,0400	0,0401	0,0402	0,0401	0,0001	0,0001	0,41
0,06	0,0599	0,0601	0,0602	0,0601	0,0001	0,0001	0,41
0,08	0,0806	0,0807	0,0808	0,0807	0,0007	0,0001	0,32
0,10	0,1004	0,1008	0,1009	0,1007	0,0007	0,0001	0,42
0,12	0,1211	0,1212	0,1210	0,1211	0,0011	0,0001	0,30
0,14	0,1408	0,1403	0,1405	0,1405	0,0005	0,0001	0,36
0,16	0,1607	0,1602	0,1604	0,1604	0,0004	0,0001	0,34
0,18	0,1808	0,1805	0,1805	0,1806	0,0006	0,0001	0,31
0,20	0,2002	0,2005	0,2006	0,2004	0,0004	0,0001	0,31

Tablica 5.4 : Rezultati provjere veličine otiska na tvrdomjeru ZWICK

Inducirana, mm	Duljina				Pogreška		Proširena mjerna nesigurnost, %
	l_1 , mm	l_2 , mm	l_3 , mm	l_{sr} , mm	mm	%	
0,02	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0000	0,0001	0,29
0,04	0,0402	0,0404	0,0404	0,0403	0,0003	0,0001	0,44
0,06	0,0602	0,0603	0,0603	0,0603	0,0003	0,0001	0,29
0,08	0,0802	0,0801	0,0797	0,0800	0,0000	0,0001	0,48
0,10	0,0980	0,1020	0,1000	0,1000	0,0000	0,0001	2,33

5.3.3. Provjera ispitnog ciklusa

Provjera ispitnog ciklusa izvršava se mjerenjem trajanja postizanja zadane sile i trajanja djelovanja ispitne sile. Vrijeme se mjeri štopericom.

U tablicama 5.5 i 5.6 se nalaze podaci provjere ispitnog ciklusa.

Tablica 5.5 : Rezultati provjere ispitnog ciklusa na tvrdomjeru INDENTEC

Ispitna metoda	Trajanje postizanja zadane sile, s		Trajanje djelovanja ispitne sile, s		Mjerna nesigurnost mjerenja, s
	zahtijevano	izmjereno	zahtijevano	Izmjereno	
HV1	2-8	8	10-15	10	$\pm 0,5$

Tablica 5.6 : Rezultati provjere ispitnog ciklusa na tvrdomjeru ZWICK

Ispitna metoda	Trajanje postizanja zadane sile, s		Trajanje djelovanja ispitne sile, s		Mjerna nesigurnost mjerenja, s
	zahtijevano	izmjereno	zahtijevano	Izmjereno	
HV1	2-8	5	10-15	12	$\pm 0,5$

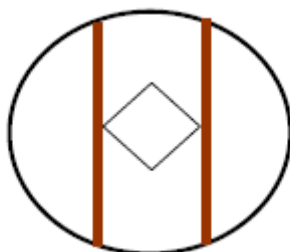
5.3.4. Indirektna metoda umjeravanja

Indirektna metoda umjeravanja tvrdomjera provedena je pomoću etalonskih pločica tvrdoće.

Korištene su sljedeće etalonske pločice:

- 206,7 HV1 ± 3 HV1,
- 461,9 HV1 ± 5 HV1,
- 757,0 HV1 ± 8 HV1.

Površine etalonske pločice (ispitna i nalijegajuća) potrebno je prethodno očistiti od prašine ili nečistoća. Nakon toga se pločica postavlja na površinu ispitnog stolića u odgovarajući položaj. Na svakoj etalonskoj pločici indenterom se utiskuje pet otiska kao što je prikazano na slici 5.5 i mjere se duljine dijagonala. Na temelju tih mjerenja izračunate su vrijednosti izmjerene tvrdoće, pogreške točnosti i ponovljivost, prema normi HRN EN ISO 6507-2. Prvo mjerenje se odbacuje zbog zračnosti između nalijegajuće površine pločice i površine ispitnog stolića. Rezultati se nalaze u tablicama 5.7 i 5.8.



Slika 5.5: Postavljanje etalonske pločice

Tablica 5.7 : Rezultati mjerenja na tvromjeru INDENTEC

Uzorak	Br. mjerenja	Dijagonala otiska d , mm	Izmjerena tvrdoća HV	Aritmetička sredina izmjerenih tvrdoća	Pogreška točnosti E_{rel} %	Ponovljivost r_{rel} %	Proširena mjerna nesigurnost, U , %
206,7 HV1 ± 3 HV1	1	$d_1=0,0942$ $d_2=0,0930$	211,6	208,08	0,667	$r=8,3$ $r_{rel}=3,97$ %	$\pm 5,2$ HV1 $\pm 2,52$ %
	2	$d_1=0,0966$ $d_2=0,0926$	207,2				
	3	$d_1=0,0938$ $d_2=0,0945$	208,9				
	4	$d_1=0,0960$ $d_2=0,0949$	203,3				
	5	$d_1=0,0951$ $d_2=0,0931$	209,4				
461,9 HV1 ± 5 HV1	1	$d_1=0,0641$ $d_2=0,0649$	459,8	459,24	-0,575	$r=7,2$ $r_{rel}=1,567$ %	$\pm 12,99$ HV1 $\pm 2,81$ %
	2	$d_1=0,0640$ $d_2=0,0635$	455,5				
	3	$d_1=0,0632$ $d_2=0,0633$	462,7				
	4	$d_1=0,0627$ $d_2=0,0638$	462,7				
	5	$d_1=0,0641$ $d_2=0,0635$	455,5				
757 HV1 ± 8 HV1	1	$d_1=0,0491$ $d_2=0,0493$	766,1	774,3	2,283	$r=15,8$ $r_{rel}=1,02$ %	$\pm 17,4$ HV1 $\pm 2,30$ %
	2	$d_1=0,0487$ $d_2=0,0491$	775,5				
	3	$d_1=0,0494$ $d_2=0,0488$	769,2				
	4	$d_1=0,0483$ $d_2=0,0493$	778,7				
	5	$d_1=0,0486$ $d_2=0,0488$	781,9				

Tablica 5.8 : Rezultati mjerenja na tvrdomjeru ZWICK

Uzorak	Br. mjerenja	Dijagonala otiska d , mm	Izmjerena tvrdoća HV	Aritmetička sredina izmjerenih tvrdoća	Pogreška točnosti E_{rel} %	Ponovljivost r_{rel} , %	Proširena mjerna nesigurnost, U , %
206,7 HV1 ± 3 HV1	1	$d_1=0,093$ $d_2=0,095$	210	207,8	0,532	$r=8$ $r_{rel}=3,84$ %	$\pm 4,62$ HV1 $\pm 2,24$ %
	2	$d_1=0,094$ $d_2=0,0955$	206				
	3	$d_1=0,0935$ $d_2=0,094$	211				
	4	$d_1=0,094$ $d_2=0,095$	203				
	5	$d_1=0,094$ $d_2=0,0945$	209				
461,9 HV1 ± 5 HV1	1	$d_1=0,0645$ $d_2=0,065$	451	461,4	-0,108	$r=24$ $r_{rel}=5,201$ %	$\pm 14,01$ HV1 $\pm 3,03$ %
	2	$d_1=0,063$ $d_2=0,0645$	453				
	3	$d_1=0,065$ $d_2=0,063$	453				
	4	$d_1=0,062$ $d_2=0,063$	475				
	5	$d_1=0,0625$ $d_2=0,0625$	475				
757 HV1 ± 8 HV1	1	$d_1=0,04925$ $d_2=0,04975$	757	775,2	2,404	$r=35$ $r_{rel}=4,514$ %	$\pm 34,02$ HV1 $\pm 4,48$ %
	2	$d_1=0,049$ $d_2=0,048$	788				
	3	$d_1=0,04925$ $d_2=0,0495$	760				
	4	$d_1=0,048$ $d_2=0,04875$	792				
	5	$d_1=0,049$ $d_2=0,0485$	779				

5.4 Provođenje mjerenja tvrdoće

Da bi se tvrdomjeri mogli bolje usporediti provedena su mjerenja tvrdoće na dva uzorka. Na svakom tvrdomjeru izmjereno je metodom HV1 niz po deset mjerenja na svakom uzorku.

Standardno odstupanje računa se prema izrazu:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} (\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)} \quad 5.1$$

gdje su:

x_i - procjena i-te mjerene ulazne veličine,

\bar{x} - aritmetička sredina mjerene ulazne veličine,

n - broj mjerenja.

Standardna mjerna nesigurnost računa se prema izrazu:

$$u_{\bar{x}} = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{n}} = \frac{1,15 \cdot s_x}{\sqrt{10}} \quad 5.2$$

Rezultati mjerenja nalaze se u tablicama 5.9 za INDENTEC i 5.10 za ZWICK.

Tablica 5.9 : Rezultati mjerenja tvrdoće trdomjerom INDENTEC

Uzorak	Br. mjerenja	Izmjerena tvrdoća, HV1	Aritmetička sredina izmjerenih tvrdoća	Standardno odstupanje, s_x , HV1	Standardna mjerna nesigurnost, $u_{\bar{x}}$, HV1	Proširena mjerna nesigurnost, U , HV1
1	1	216,2	221,23	6,27	2,28	6,92
	2	215,3				
	3	222,4				
	4	213,9				
	5	232,0				
	6	227,9				
	7	225,9				
	8	222,4				
	9	213,9				
	10	222,4				
2	1	903,6	873,89	41,90	15,24	35,10
	2	915,7				
	3	936,4				
	4	835,8				
	5	857,6				
	6	801,5				
	7	895,7				
	8	895,7				
	9	853,9				
	10	843,0				

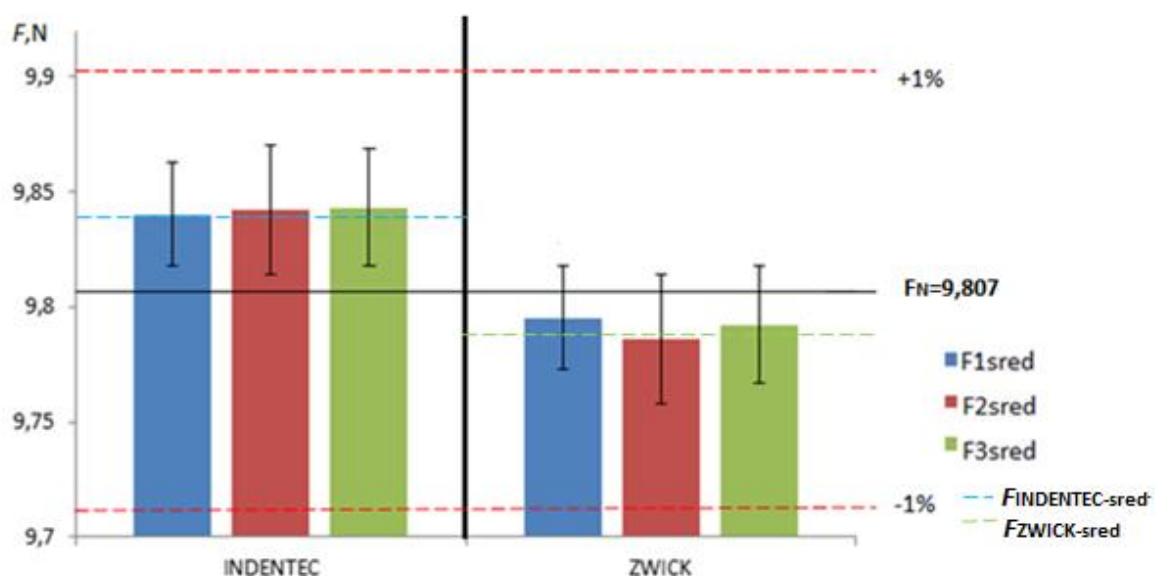
Tablica 5.10 : Rezultati mjerenja tvrdoće trdomjerom ZWICK

Uzorak	Br. mjerenja	Izmjerena tvrdoća, HV	Aritmetička sredina izmjerenih tvrdoća	Standardno odstupanje, s_x , HV	Standardna mjerna nesigurnost, $u_{\bar{x}}$, HV	Proširena mjerna nesigurnost, U , $HV1$
1	1	201	210,1	8.21	2,99	7,56
	2	209				
	3	200				
	4	213				
	5	229				
	6	205				
	7	213				
	8	208				
	9	209				
	10	214				
2	1	788	788,9	16,43	5,97	36,05
	2	788				
	3	763				
	4	812				
	5	812				
	6	779				
	7	788				
	8	805				
	9	772				
	10	782				

6. ANALIZA REZULTATA

6.1. Analiza rezultata provjere sila opterećenja

Na temelju ispitivanja sila opterećivanja koja su provedena na INDENTEC-u (tablica 5.1) i ZWICK-u (tablica 5.2), izvršena je analiza minimalnih, srednjih i maksimalnih vrijednosti sila te njihovih odstupanja od normom utvrđenih vrijednosti opterećenja. Na slici 6.1. prikazani su dijagramski rezultati provjere sile opterećivanja na tvrdomjerima INDENTEC i ZWICK.

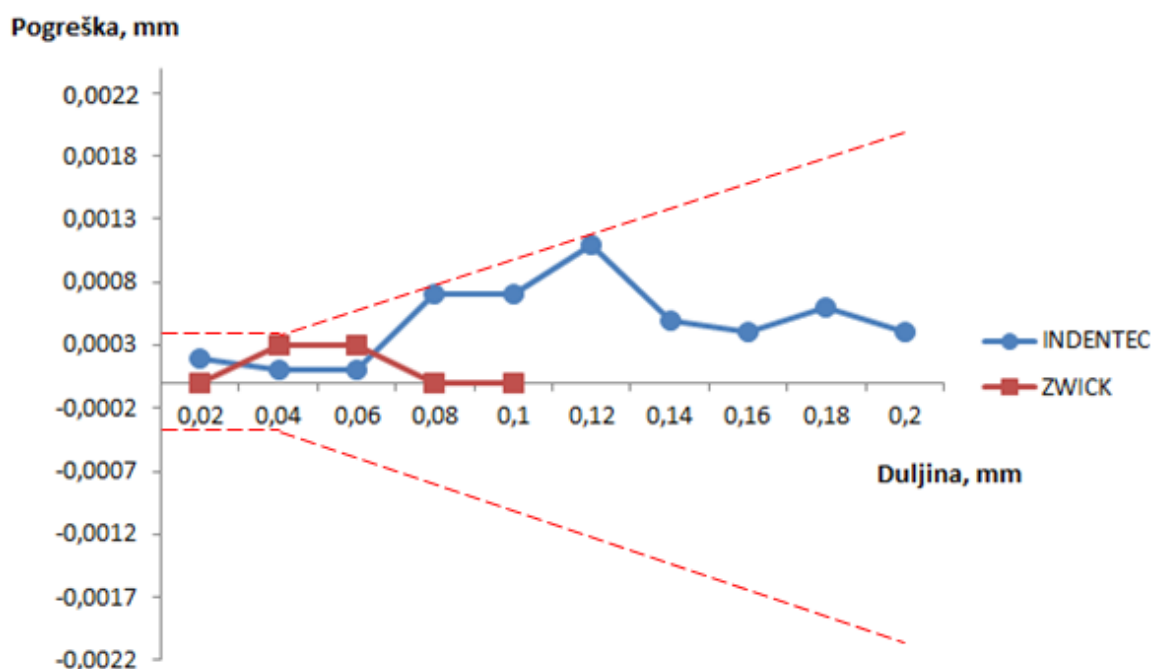


Slika 6.1: Dijagramski prikaz rezultata provjere sile opterećenja

Za opterećenje HV1 sila propisana normom mora biti $F_N=9,807 \text{ N}$ uz dozvoljeno odstupanje $\pm 1 \%$ što je u dijagramu prikazano isprekidanim crvenim linijama. Iz dijagrama je vidljivo da je maksimalno odstupanje tvrdomjera ZWICK u drugom mjerenju $q = 0,21 \% \pm 0,16 \%$ što znači da maksimalna pogreška može biti $0,37 \%$, a to je daleko ispod dozvoljenih 1% . Kod INDENTECA maksimalno odstupanje u trećem mjerenju je $q = 0,37 \% \pm 0,12 \%$ što znači da maksimalna pogreška može biti $0,49 \%$ što je također ispod dozvoljenih 1% . Srednja vrijednost sile opterećivanja za INDENTEC iznosi $F_{INDENTEC-sred}=9,84176 \text{ N}$, a za ZWICK iznosi $F_{ZWICK-sred}=9,79115 \text{ N}$. Iz toga možemo zaključiti da je sila opterećivanja za tvrdomjer INDENTEC nešto malo veća od sile propisane normom, dok je za tvrdomjer ZWICK sila opterećivanja manja od sile propisane normom, ali u oba slučaja unutar dozvoljenih odstupanja sukladno normi HRN EN ISO 6507-2.

6.2 Analiza provjere sustava za očitavanje veličine otiska

Na temelju ispitivanja sustava za očitavanje veličine otiska koja su provedena na tvrdomjerima INDENTEC (tablica 5.3) i ZWICK (tablica 5.4) izvršena je analiza pogreške na određenim duljinama prikazana na slici 6.2. Crvenom isprekidanom crtom označena je maksimalna dozvoljena pogreška koja je određena po tablici 4.4.

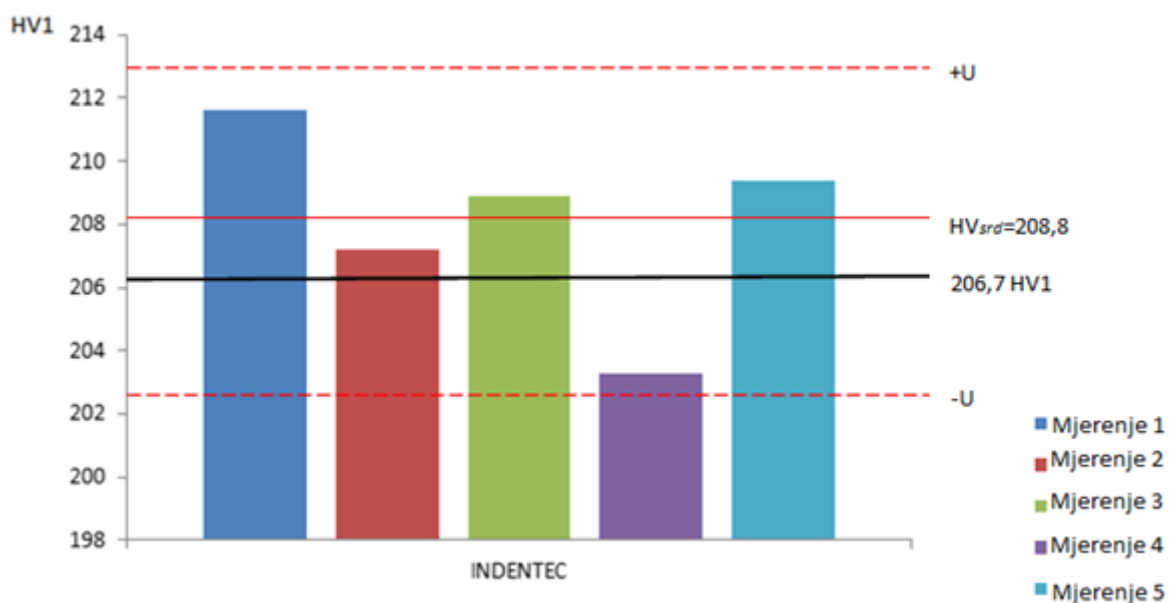


Slika 6.2: Dijagramski prikaz pogreške očitavanja na određenim duljinama

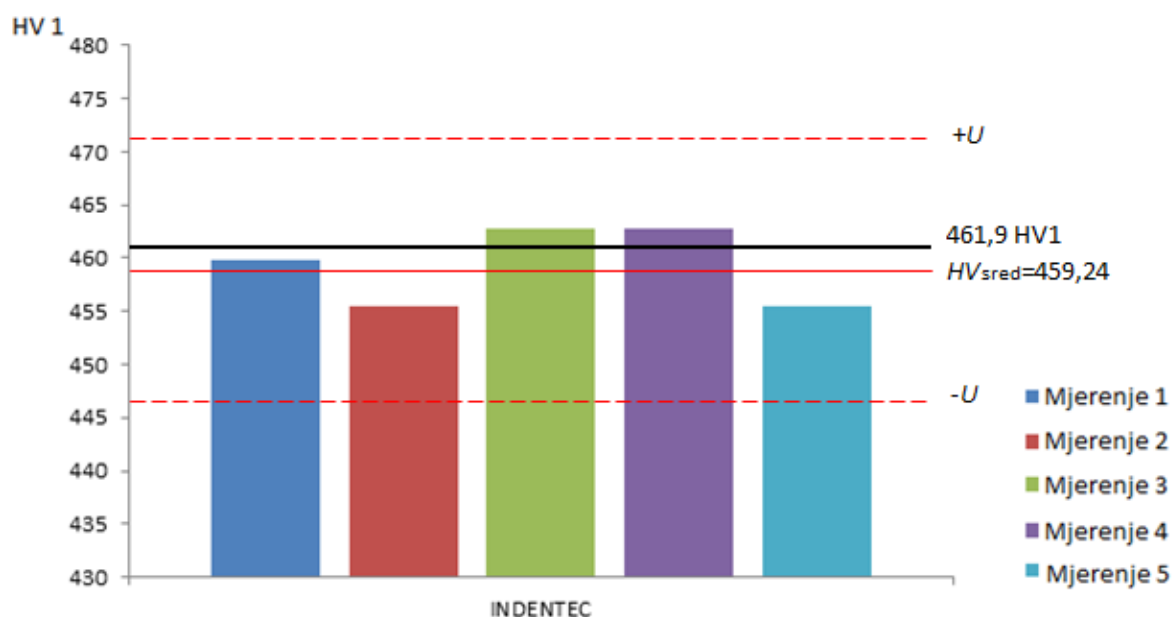
Iz dijagramskog prikaza može se zaključiti da izmjerene vrijednosti nisu prekoračile maksimalno dozvoljenu pogrešku. Kod INDENTEC-ovog sustava za očitavanje pogreška do 0,12 mm približava se dozvoljenoj graničnoj vrijednosti.

6.3. Analiza rezultata umjeravanja indirektnom metodom

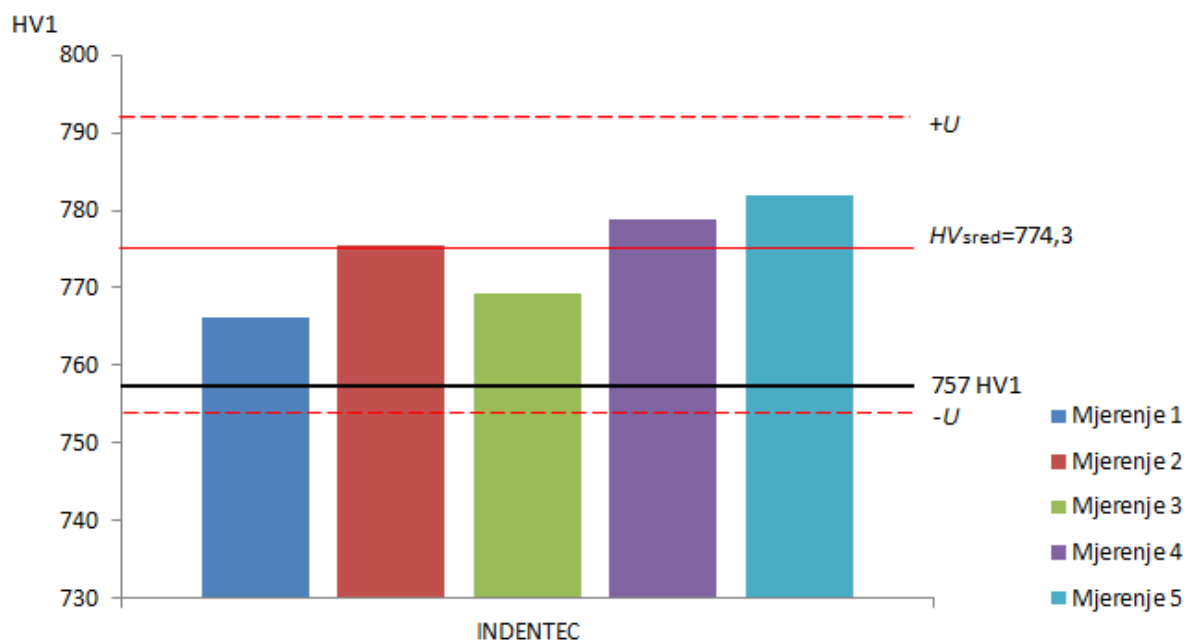
Indirektna metoda umjeravanja tvrdomjera INDENTEC i ZWICK provedena je u skladu s normom HRN EN ISO 6507-2 za opterećenje HV1. Na slikama 6.3, 6.4 i 6.5 prikazana je srednja vrijednost izmjerenih tvrdoća te proširena mjerna nesigurnost na tvrdomjeru INDENTEC, a na slikama 6.6, 6.7 i 6.8 srednja vrijednost izmjerenih tvrdoća te proširena mjerna nesigurnost na tvrdomjeru ZWICK. Crvenom punom crtom prikazane su srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća dok su isprekidanim crvenim crtama prikazane vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti.



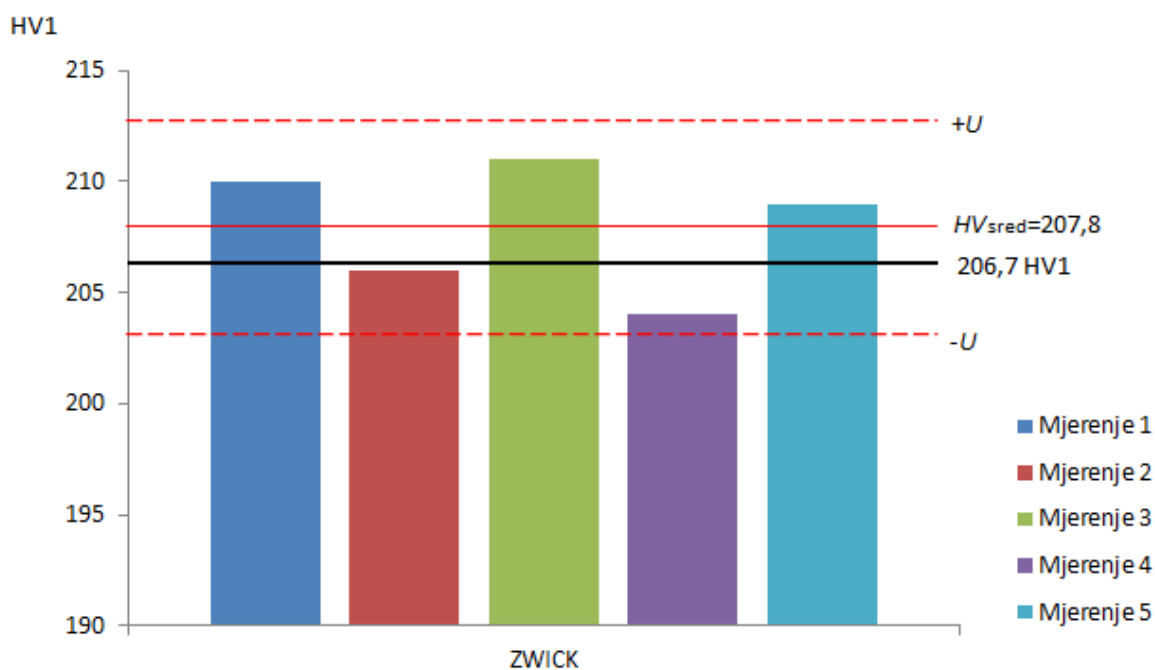
Slika 6.3: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 206,7 HV1 na tvrdomjeru INDENTEC



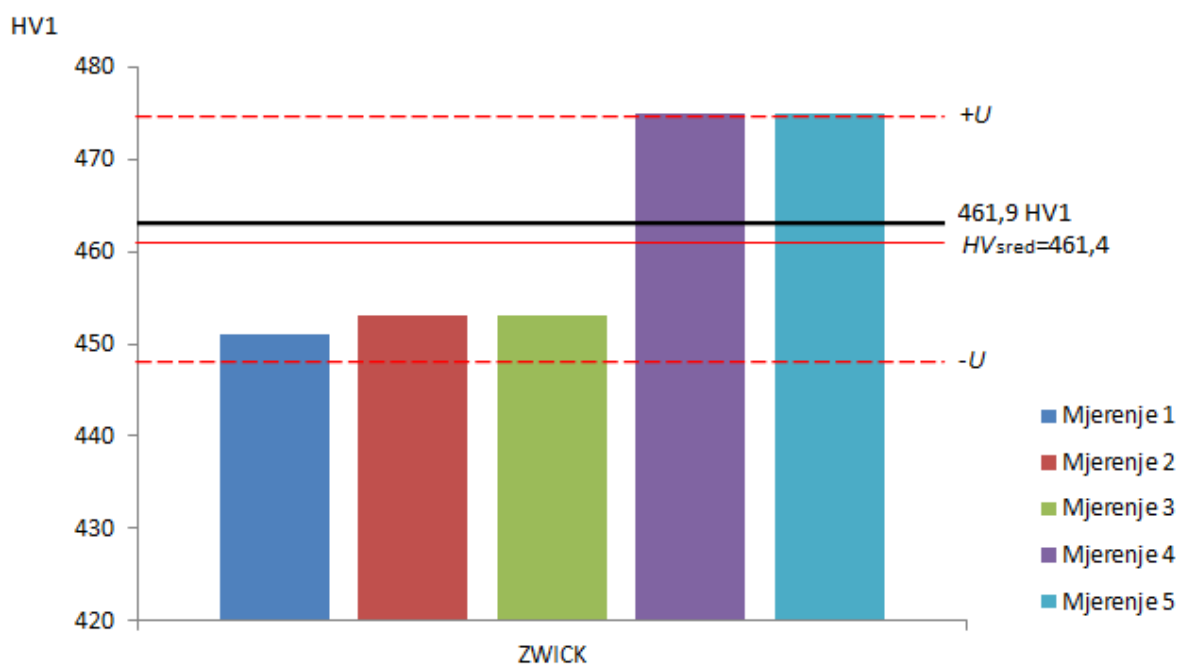
Slika 6.4: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 461,9 HV1 na tvrdomjeru INDENTEC



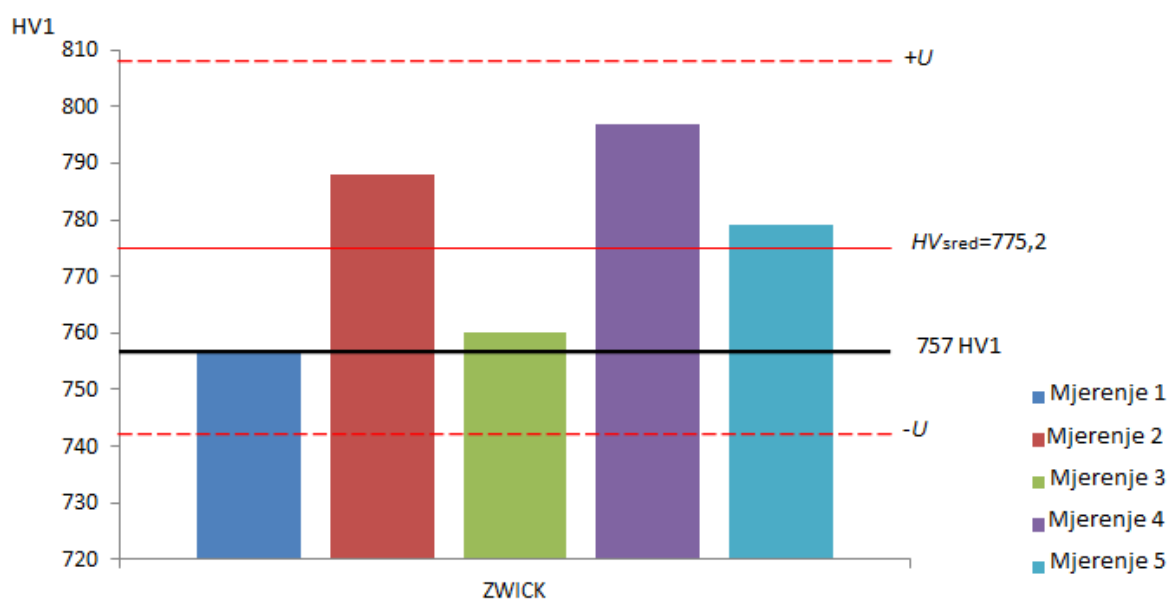
Slika 6.5: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 757 HV1 na tvrdomjeru INDENTEC



Slika 6.6: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 206,7 HV1 na tvrdomjeru ZWICK



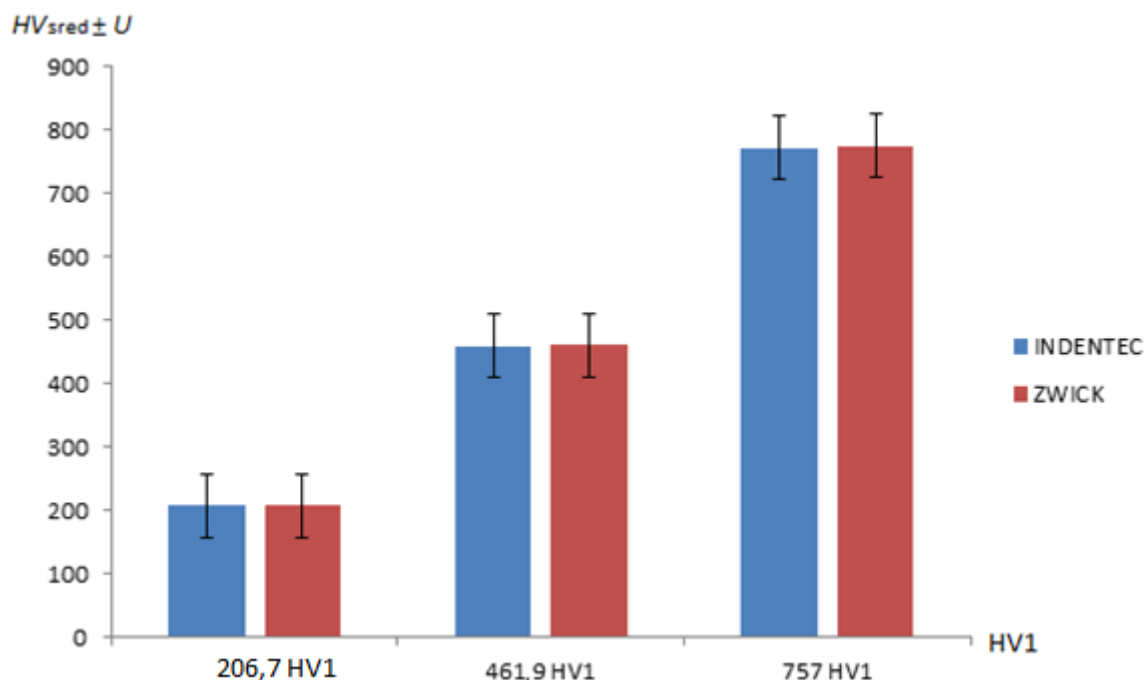
Slika 6.7: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 461,9 HV1 na tvrdomjeru ZWICK



Slika 6.8: Dijagramski prikaz srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća te proširene mjerne nesigurnosti etalonske pločice 757 HV1 na tvrdomjeru ZWICK

Iz dijagrama (slike 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8) može se zamijetiti da je odstupanje srednje vrijednosti u odnosu na referentnu značajno veće kod viših vrijednosti tvrdoća (pločica 775 HV1). Razlog tome je mala dijagonala pa sustavi za očitavanje pridonose dosta svojom pogreškom.

Na slici 6.9 Prikazan je dijagram izmjerenih srednjih vrijednosti tvrdoća pri umjeravanju sa proširenom mjernom nesigurnošću na tvrdomerima INDENTEC i ZWICK za svaku etalonsku pločicu.



Slika 6.9: Dijagramski prikaz izmjerenih srednjih tvrdoća s proširenom mjernom nesigurnošću na tvrdomerima INDENTEC i ZWICK

Vrijednosti odstupanja uređaja od referentne vrijednosti i maksimalno odstupanje uređaja s uključenom mjernom nesigurnošću nalaze se u tablici 6.1. Odstupanje uređaja od referentne vrijednosti računa se prema izrazu:

$$\bar{b} = \bar{H} - H_C \quad 6.1$$

Maksimalno odstupanje uređaja računa se prema izrazu:

$$\Delta H_{TMNmax} = U_{HTM} + |\bar{b}| \quad 6.2$$

Na temelju tog prikaza može se zaključiti da između srednjih vrijednosti izmjerene tvrdoće nema neke značajne razlike.

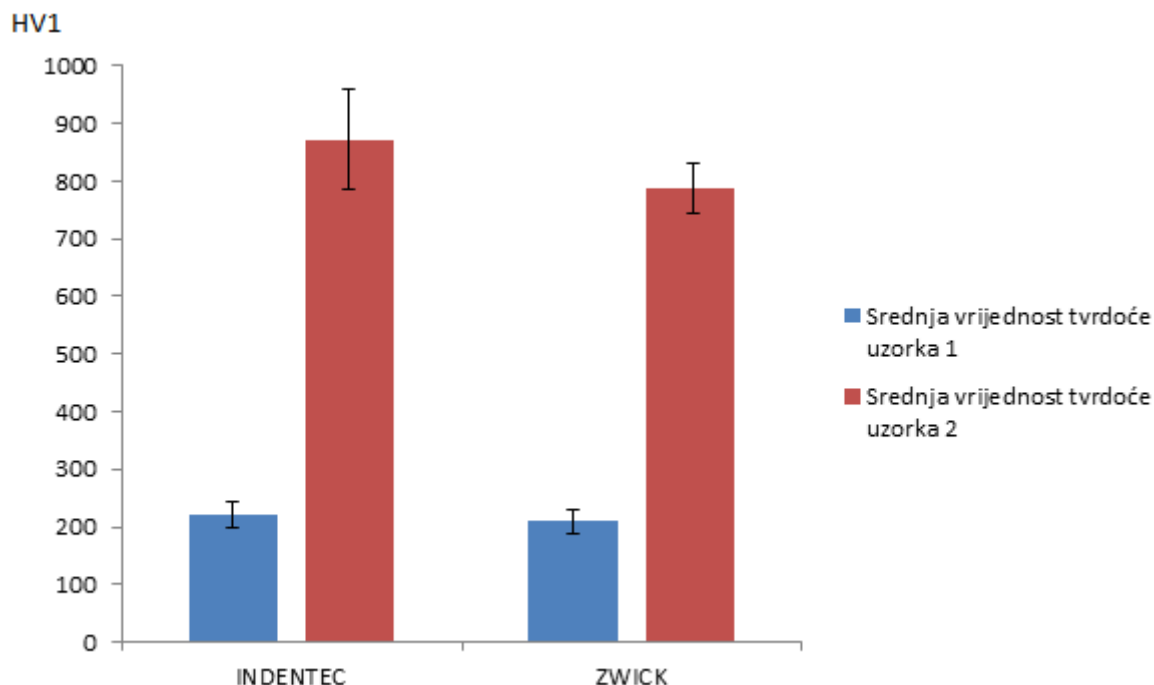
Tablica 6.1 : Rezultati odstupanja uređaja od referentne vrijednosti i maksimalno odstupanje uređaja s uključenom mjernom nesigurnošću

Etalonska pločica	ZWICK			INDENTEC		
	$U_{\text{HTM}}, \text{HV1}$	$\bar{b}, \text{HV1}$	$\Delta H_{\text{TMmax}}, \text{HV1}$	$U_{\text{HTM}}, \text{HV1}$	$\bar{b}, \text{HV1}$	$\Delta H_{\text{TMmax}}, \text{HV1}$
206,7 HV1	4,62	1,1	5,72	5,2	1,38	6,58
461,9HV1	14,01	-0,5	14,51	12,99	-2,66	15,65
757HV1	34,02	18,2	52,22	17,4	15,6	33

Kod nižih vrijednosti tvrdoća ZWICK ima manje odstupanje zbog toga što je sustav za očitavanje kod INDENTEC-a prilagođen za ispitivanje tvrdoće po Vickers metodi s opterećenjima HV1 do HV50.

6.4 Analiza mjerenja tvrdoće

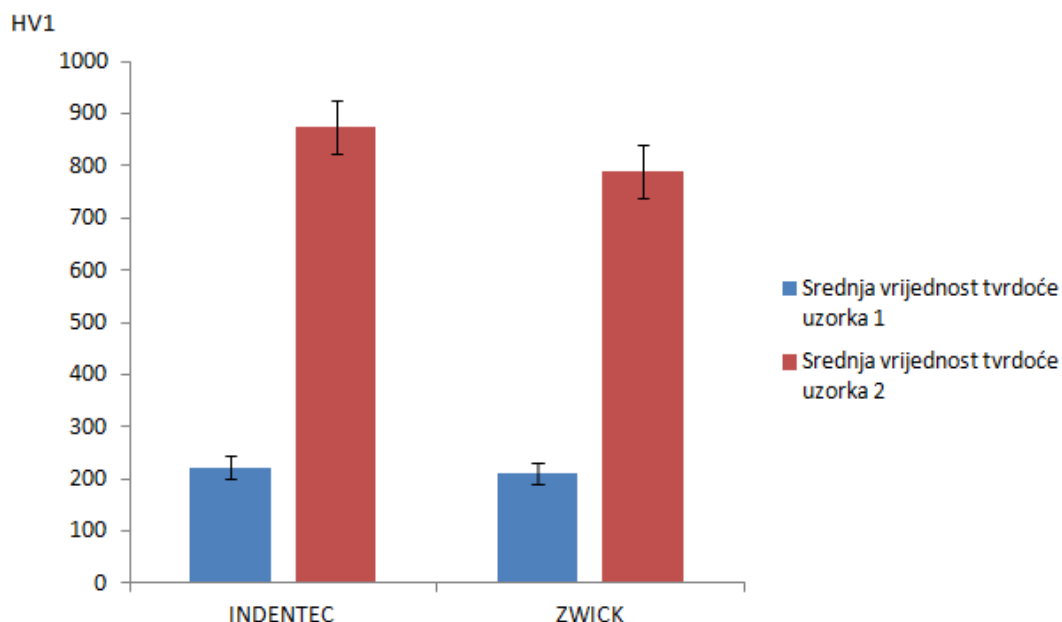
Prema rezultatima mjerenja na dva ispitna uzorka danih u tablicama 5.9 i 5.10 napravljena je analiza rezultata. Na slici 6.10 dan je dijagramski prikaz srednjih izmjerenih vrijednosti tvrdoće za oba uzorka sa standardnim odstupanjem.



Slika 6.10 : Dijagramski prikaz srednjih izmjerenih vrijednosti tvrdoće za oba uzorka sa standardnim odstupanjem

Kod tvrdomjera ZWICK su standardna odstupanja pri višim tvrdoćama nešto niža.

Na slici 6.11 dan je dijagramski prikaz srednjih izmjerenih vrijednosti mjerene tvrdoće za oba uzorka s proširenom mjernom nesigurnošću koja je očitana iz tablice 5.9 za INDENTEC i 5.10 za ZWICK.



Slika 6.11: Dijagramski prikaz srednjih vrijednosti mjerene tvrdoće s proširenom mjernom nesigurnošću

U dijagramu 6.11 prikazane vrijednosti mjerne nesigurnosti su bez odstupanja tvrdomjera od referentne vrijednosti (\bar{b}). Ako bismo unijeli tu vrijednost pogreška bi bila još veća. Pogotovo je ona izražena kod visokih tvrdoća (vidi tablicu 6.1). Ovu vrijednost pogreške uređaja trebalo bi dodati u mjerni rezultat ali isto tako mjernu nesigurnost iste.

7. ZAKLJUČAK

Mjerenje tvrdoće smatra se jednostavnom metodom za određivanje mehaničkih svojstava materijala, ali ipak procjena mjerne nesigurnosti je kompleksan zahtjev zbog čitavog niza utjecajnih faktora. U ovom radu je promatran utjecaj mjerne sposobnosti tvrdomjera na nesigurnost mjerenja. Na temelju rezultata ispitivanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Mjerna sposobnost tvrdomjera ovisi o kvaliteti uređaja za očitavanje veličine otiska, točnosti sustava za opterećivanje i okolišnim uvjetima.
- Najveći doprinos mjernoj nesigurnosti mjerenja tvrdoće proizlazi iz rezolucije i rezultata umjeravanja sustava za očitavanje veličine otiska. Taj problem je jako izražen kod tvrdomjera s više metoda tako da kod graničnih metoda mjerno područje sustava očitavanja je na rubu svojih mjernih sposobnosti što uvelike doprinosi mjernoj nesigurnosti.
- Sustav za opterećivanja ima mali doprinos mjernoj nesigurnosti ako je vrijednost sile unutar dopuštenih granica odstupanja sukladno normi.
- Odstupanje pokazivanja tvrdomjera od vrijednosti referentne etalonske pločice također ima veliki doprinos mjernoj sposobnosti tvrdomjera. U eksperimentalnom dijelu je to zamijećeno posebno kod viših vrijednosti tvrdoća kod oba tvrdomjera.
- Sve ovo se odražava na kraju na mjernu nesigurnost mjerenja tvrdoće. Iz rezultata mjerenja i analize može se uvidjeti da je utjecaj sposobnosti (nesigurnosti) tvrdomjera znatno veći od same nesigurnosti proizašle iz samih rezultata mjerenja tvrdoće.
- Procjena i proračun mjerne nesigurnosti mjerenja tvrdoće uvelike ovisi o poznavanju mjerne sposobnosti tvrdomjera na kojem se provodi mjerenje, te zahtjeva iskustvene i znanstvene prosudbe pri njenom određivanju.

8. LITERATURA

- [1] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje – Zagreb, 1998.
- [2] www.ptb.de: PTB-Arbeitsgruppe 5.12 Härtemesstechnik
- [3] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a>
- [4] http://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a_po_Vickersu
- [5] <http://zygan.freehost.pl/tekst/p%201TM.html>
- [6] HRN EN ISO 6507 Metallic materials -- Vickers hardness test -- Part 1
- [7] http://www.vorax.hr/pdf/ispitivanje_tvrdoce.pdf
- [8] M. Barišić- Iskazivanje mjernih rezultata, Seminar, Hrvatsko mjeriteljsko društvo
- [9] Povjerenstvo za izobrazbu: Stručna osposobljenost laboratorija, 2 izdanje, HMD, Zagreb, 1998.
- [10] EA 10-16, Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements, 2001
- [11] <http://www.svijet-kvalitete.com/index.php/umjeravanje/1149-umjeravanje-i-sljedivost-rezultata-mjerenja>
- [12] <http://www.svijet-kvalitete.com/index.php/umjeravanje/484-mjerna-sljedivost>
- [13] HRN EN ISO 6507 Metallic materials -- Vickers hardness test -- Part 2: Verification and calibration of testing machines